



Casa abierta al tiempo

**Universidad Autónoma Metropolitana**

**Azcapotzalco**

*Modelado de un reactor de lixiviación para el proceso de extracción de metales contenidos en minerales de baja ley*

## *TESIS*

*Que presenta el Ingeniero Químico*

*Raúl Juárez Mata*

*Para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería de Procesos*

*Director de Tesis:*

*Dra. Rosa María Luna Sánchez  
Departamento de Energía UAM-A*

*Co-Director de Tesis:*

*Dr. Alejandro R. Alonso Gómez  
Departamento de Energía UAM-A*



*A*

*Mi esposa, hermanas e hijos  
con admiración y respeto*

---

## Agradecimientos

Dra. Rosa María Luna Sánchez	Por los conocimientos, orientación y apoyo sin los cuales no habría sido posible este trabajo
Dr. Alejandro R. Alonso Gómez	Por los conocimientos en la elaboración de la parte experimental de este trabajo.
Dr. Jorge Ramírez Muñoz	Por el apoyo en la elaboración del modelado, simulación y sus conocimientos en el manejo del software ANSYS-Fluent.
M en C. Gastón Martínez de Jesús.	Por la enseñanza y manejo del software ANSYS-Fluent.
Dra. Gretchen Lapidus Lavine	Por la revisión y corrección de este trabajo.
A todos los profesores del posgrado en ingeniería de procesos	Por las enseñanzas recibidas durante mi estancia en el posgrado.

---

## Resumen

En el presente trabajo se realizó un estudio hidrodinámico, mediante dinámica de fluidos computacional, Computational Fluids Dynamics, CFD, del comportamiento de dos tipos de impulsores comerciales, uno de alto corte (disco tipo Norstone®) y otro convencional (turbina Rushton estándar). Los resultados obtenidos mediante las simulaciones se validaron con mediciones experimentales de potencia. El estudio se realizó en un tanque agitado con baffles operando en el régimen turbulento, del cual se obtuvo a través de las simulaciones, el parámetro de macro mezclado, de número de potencia. En el sistema experimental se utilizó un mineral de Fresnillo en una concentración de 20% en sólidos en una solución de tiourea. La cuantificación de los metales extraídos, oro, plata y cobre, fue realizada por análisis químico en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica, y la morfología de los sólidos sin reaccionar a través de Microscopia Electrónica de Barrido, con el fin de evaluar el desempeño de cada impulsor en la extracción de plata contenida en minerales refractarios o de baja ley.

De los resultados experimentales se observa un mejoramiento en el proceso de extracción de plata con el sistema de agitación equipado con el disco Norstone®, el cual es similar al obtenido mediante un tratamiento con ondas ultrasónicas. Los resultados de la simulación fueron utilizados para explicar este fenómeno. Se determinó que, a una misma potencia inyectada, el disco Norstone® induce una mayor disipación de energía alrededor de su volumen barrido, esto con respecto a la Turbina Rushton. Esta diferencia entre las potencias inyectadas por cada impulsor, se traduce también en un incremento en los niveles de extracción de plata cuando se utiliza el disco Norstone.

## Índice

Agradecimientos .....	ii
Resumen .....	iii
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tablas .....	viii
Simbología.....	ix
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 Procesos de Extracción de Metales.....	4
2.1.1 Pirometalurgia .....	4
2.1.2 Hidrometalurgia .....	5
2.2 Agentes Lixiviantes.....	6
2.2.1 Lixiviación con cianuro .....	6
2.2.2 Lixiviación con tiourea.....	7
2.3 Métodos de lixiviación .....	9
2.3.1 Lixiviación por agitación .....	9
2.4 Tipos de impulsores.....	11
2.4.1 Impulsores de flujo axial .....	11
2.4.2 Impulsores de flujo radial .....	12
2.4.3 Impulsores de alto corte.....	13
2.5 Mecánica de Fluidos Computacional .....	14
2.5.1 Modelos de turbulencia .....	14
2.5.2 Modelo de turbulencia $\kappa$ - $\varepsilon$ standard.....	16

---

2.5.3 Parámetros que caracterizan la hidrodinámica en tanques agitados .....	18
 CAPÍTULO 3 OBJETIVOS .....	 21
3.1 Hipótesis .....	21
3.2 Objetivo general .....	21
3.2.1 Objetivos particulares .....	21
 CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA .....	 23
4.1 Metodología experimental .....	23
4.1.1 Termodinámica de la tioureación .....	23
4.1.2 Lixiviaciones a nivel micro y macroscópico .....	24
4.2 Metodología numérica .....	30
4.2.1 Geometría del modelo .....	30
4.2.2 Mallado del dominio computacional .....	32
4.2.3 Resolución de las ecuaciones .....	33
 CAPÍTULO 5 RESULTADOS .....	 38
5.1 Análisis termodinámico del sistema Ag-Tu .....	38
5.2 Lixiviaciones del mineral concentrado .....	40
5.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	44
5.4 Desempeño hidrodinámico de los impulsores .....	47
5.4.1 Validación de la simulación .....	47
5.4.2 Campos de velocidades .....	48
5.4.3 Disipación de energía .....	50
 CAPÍTULO 6 CONCLUSIÓN .....	 52
 Bibliografía .....	 53

---

## Índice de Figuras

Figura 2. 1 Lixiviación (Extracción sólido-líquido) .....	6
Figura 2. 2 Impulsores de flujo axial; a) turbina de aspas inclinadas, b) hidrofoil de 4 aspas y c) .....	11
Figura 2. 3 Impulsores de flujo radial; a) curva abierta con disco, b) curva abierta y c) turbina .....	12
Figura 2. 4 Impulsor de flujo radial (turbina Rushton) .....	13
Figura 2. 5 Impulsores de alto corte a) impulsor Hock-2A y b) disco Norstone. ....	13
Figura 4.1 Equipo de agitación Dispermat® tipo AE01 .....	26
Figura 4.2 Diagrama de la instalación experimental.....	27
Figura 4.3 Planos a escala de los impulsores utilizados .....	28
Figura 4.4 Geometrías en 3D de los modelos elaborados a) tanque provisto con la turbina Rushton y b) tanque provisto con el impulsor de disco Norstone....	30
Figura 4.5 Segmentación del dominio tanto para la turbina Rushton (a) como para el disco Norstone (b).....	31
Figura 4.6 Malla utilizada para la simulación con la Turbina Rushton .....	32
Figura 4.7 Malla utilizada para la simulación con el Disco Norstone .....	33
Figura 5. 1 Diagrama de predominio tipo Pourbaix para el sistema Ag-Tu-S. con concentraciones de 0.4M, 0.0066M y 0.25M; para la Tiourea, Plata y Sulfato respectivamente .....	39
Figura 5.2 Porcentaje de extracción de plata para las lixivitaciones realizadas en un volumen de reacción de 250 ml utilizando barra magnética como agitador. Solución 0.4 M de tiourea, 0.1M peróxido de hidrogeno y 0.25 M de ácido sulfúrico en presencia y ausencia de ondas ultrasónicas • y Δ respectivamente. Solución 0.01 M de cianuro de sodio pH 10.5 ♦. Densidad de pulpa del 20%.41	
Figura 5. 3 Lixiviaciones en tanque agitado con 1.875 l como volumen de reacción al utilizar la turbina Rushton * y el disco Norstone □ a concentraciones de 0.4M, 0.1M y 0.25M de Tiourea, peróxido de hidrogeno y ácido sulfúrico respectivamente, con una densidad de pilpa del 20% .....	42

---

Figura 5. 4 Micrografías de los residuos obtenidos de las lixivitaciones de 6 horas con diferentes sistemas de agitación, de izquierda a derecha; a) Tiourea-Ultrasonido, b) Tiourea-Disco Norstone, c) Tiourea-Turbina Rushton, d) Tiourea-agitación magnética y e) Proceso de cianuración. ....	46
Figura 5. 5 Curva de potencia experimental y numérica: a) Turbina Rushton, y b) Disco Norstone .....	48
Figura 5. 6 Campos de velocidad a un mismo consumo de potencia ( $P=25$ W), a) turbina Rushton y b) disco Norstone.....	49
Figura 5. 7 Contorno de disipación en W/kg a una misma potencia inyectada de 25 W, a) Turbina Rushton y b) Disco Norstone .....	50



## Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Clasificación de los diferentes impulsores utilizados en la industria de acuerdo a su clase y tipo .....	11
Tabla 4. 1 Composición inicial del mineral Fresnillo-Zn .....	24
Tabla 4. 2 valores de las concentraciones utilizadas en las lixiviaciones .....	25
Tabla 4. 3 Dimensiones de los impulsores en mm .....	28
Tabla 4. 4 concentración de compuestos para la lixiviación con cianuro, una densidad de pulpa del 20% en sólidos, la solución se llevó a un pH de 10.5 ..	29
Tabla 4. 5 Especificaciones del algoritmo de solución.....	34
Tabla 4. 6 Especificaciones de los materiales.....	34
Tabla 4. 7 Especificaciones de las condiciones de operación para el sistema de agitación con la turbina Rushton.....	35
Tabla 4. 8 Especificaciones de las condiciones de operación para el sistema de agitación con el disco Norstone.....	35
Tabla 5. 1 Porcentaje total de plata extraída del mineral para cada uno de los sistemas de agitación empleados en la lixiviación .....	43

## Simbología

C	Centro del impulsor
D	Diámetro del impulsor TR
d	Diámetro del impulsor NR
F <sub>p</sub>	Vector de fuerza de presión
Fr	Número de Froude
F <sub>v</sub>	Vector de fuerza viscosa
f	Diámetro de las muescas del impulsor NR
g	Gravedad
G <sub>k</sub>	Generación de energía cinética turbulenta debida a la velocidad
G <sub>b</sub>	Generación de energía cinética turbulenta debida a las fuerzas de flotación
H	Altura teórica del tanque
h <sub>1</sub>	Altura de la cuchilla de la TR
h <sub>2</sub>	Espesor del impulsor NR
k	Diámetro del disco de la TR
l	Longitud de la muesca del impulsor Norstone
M	Molaridad
Ma	Momento total
N	Velocidad de Agitación
N <sub>p</sub>	Número de potencia
N <sub>Q</sub>	Número de bombeo
P	Potencia
p	Espesor del disco de la TR
Q	Flujo
Re	Reynolds
rpm	Revoluciones Por Minuto
$r \rightarrow$	Vector momento

---



---

T	Diámetro del tanque
t	Tiempo
$\vec{v}$	Vector velocidad
v1	Volumen de barrido en el centro del impulsor
v2	Volumen barrido por las cuchillas
v3	Volumen fuera del impulsor
w	Espesor de las cuchillas de la TR
Z	Altura del líquido
ZM	Zona móvil

### Símbolos Griegos

$\rho$	Densidad del fluido
$\mu$	Viscosidad del fluido
$\varepsilon$	Disipación de energía turbulenta
$\varepsilon_t$	Tasa de disipación turbulenta local
$M_\tau$	Momento de Torque
$\sigma_\varepsilon$	Número de Prandalt para la disipación de energía turbulenta
$\sigma_\kappa$	Número de Prandalt energía cinética turbulenta
$\kappa$	Energía cinética turbulenta
$\nabla$	Operador nabra

### Abreviaturas

CFD	Dinámica de Fluidos Computacionales
DSMA	Disulfuro de Formamidina
EAA	Espectrometría de Absorción Atómica
HSI	Impulsor de Alto Corte
MRF	Marco de Referencia Múltiple

---

---

NR	Disco Norstone
QUICK	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics
RNG	Renormalization Group Analysis of the Navier-Stokes equations Turbulence model
RRF	Marco de Referencia Rotatorio
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido
SRF	Marco de Referencia Estático
TR	Turbina Rushton

# Capítulo 1

## Introducción

---

En la industria de la minería, tanto el oro como la plata son dos de los metales de mayor importancia debido a su extraordinaria conductividad y resistencia a la corrosión. Además, por su maleabilidad y ductilidad, son altamente demandados en la industria joyera.

Para la obtención de estos metales y cubrir dicha demanda, existen varios métodos de extracción de oro y plata provenientes de las minas, como son la pirometalurgia, hidrometalurgia, electrometalurgia y bio hidrometalurgia. Los tres primeros se llevan a cabo mediante procesos físico-químicos, mientras que en el último se adiciona un proceso con microorganismos (proceso biológico).

En la industria de los minerales, la hidrometalurgia es uno de los métodos con mayor uso a nivel mundial, dónde el proceso más importante es la lixiviación de metales preciosos en medios cianurados. Pese a las altas eficiencias, el proceso de cianuración presenta inconvenientes en la operación debido a su toxicidad, además de que cada vez es más frecuente encontrarse con minerales refractarios a este proceso debido a la heterogeneidad de las menas. Lo anterior ha propiciado una exploración exhaustiva sobre el uso de compuestos químicos alternos, con propiedades menos nocivas y con altos rendimientos de recuperación de metales preciosos. Por otro lado, se busca hacer frente al problema de la refractariedad de minerales, evitando el alto consumo de agente lixivante o bien una etapa adicional como la pre-oxidación del mineral.

De los diferentes compuestos químicos que se han estudiado en las últimas décadas se encuentran la tiourea, tiosulfato y algunos halogenuros, los cuales han mostrados ser competitivos en algunos casos respecto a la cianuración. Generalmente, en la lixiviación con tiourea se obtienen conversiones relativamente altas. Además de la elección del lixivante, es importante tener en

cuenta que hay varios parámetros que afectan la extracción de los valores del mineral como son: la concentración del agente químico, temperatura, presión, pH, tiempo, tamaño de partícula y velocidad de agitación, respecto a tanques agitados.

Para llevar a cabo la lixiviación se recurre a varios métodos tales como la lixiviación en pilas, en botaderos, por percolación, entre otros. También se emplean equipos industriales como tanques de lecho fijo, de lecho móvil y tanques agitados; de estos tres equipos el más utilizado en la industria metalúrgica es el tanque agitado debido a su mejor transferencia de masa en el proceso.

Generalmente en los tanques agitados utilizados para mezclas solido-liquido, el principal objetivo es el contacto máximo entre la superficie de la partícula y la solución, para que se lleve a cabo la reacción o la transferencia de masa. Para realizar esta operación, el tanque es equipado con impulsores (agitadores), los cuales se clasifican en impulsores de flujo axial, radial y de alto corte.

Como se mencionó anteriormente la lixiviación con tiourea es uno de los procesos que mejora la extracción de oro y plata. No obstante, en la industria minera se requiere tratar grandes volúmenes de mineral, lo que repercute en la densidad y viscosidad de la pulpa. En estas condiciones la agitación de la mezcla con métodos convencionales es poco costeable por la cantidad de energía que se requiere para mover la pulpa.

Es notable el hecho de que los impulsores de alto corte no han sido utilizados en la industria minera, aunque es probable que el uso de estos dispositivos, permita mejorar la lixiviación de minerales en general y en particular de plata mediante tioureación. Por tal motivo en el presente trabajo se propone el modelado de dos tipos de impulsores, uno de flujo radial de disco con aspas planas (turbina Rushton) y uno de alto corte (disco Norstone) en un reactor de tanque agitado provisto de cuatro baffles, para el tratamiento de un mineral refractario.

Por otra parte, la simulación de CFD proporciona información detallada sobre el flujo de fluidos con ayuda de herramientas computacionales, la cual es necesaria para modelar los procesos que se llevan a cabo en tanque agitados, esto generalmente se puede hacer por medio de simuladores comerciales como lo es Fluent.

## **Capítulo 2**

### **Marco Teórico**

---

México tiene una gran cantidad de recursos mineros, por lo que su explotación a través de la minería y la protección del medio ambiente deben coexistir de manera armónica para contar con un sector sustentable. La minería ha desempeñado un papel importante en la economía del país, ya que en la actualidad es la tercera fuente generadora de ingresos. A nivel mundial México ocupa el primer lugar en la producción de plata, aunque también existen otros minerales metálicos importantes como el oro, cobre, zinc, hierro, uranio entre otros.

#### **2.1 Procesos de Extracción de Metales**

En la actualidad existen diferentes métodos de recuperación de plata, dentro de los cuales podemos mencionar los siguientes (Anjum, 2012):

1. Pirometalúrgico
2. Hidrometalúrgico

##### **2.1.1 Pirometalurgia**

El método pirometalúrgico es un proceso de fundición de minerales, con contenidos de distintas fases metálicas dentro de las cuales se tienen los metales preciosos de interés. Esta metodología permite extraer los valores de interés mediante la adición de calor (aproximadamente entre 900 y 1000°C y de 1 a 10 atm). Regularmente es empleado para la extracción de metales como el níquel,

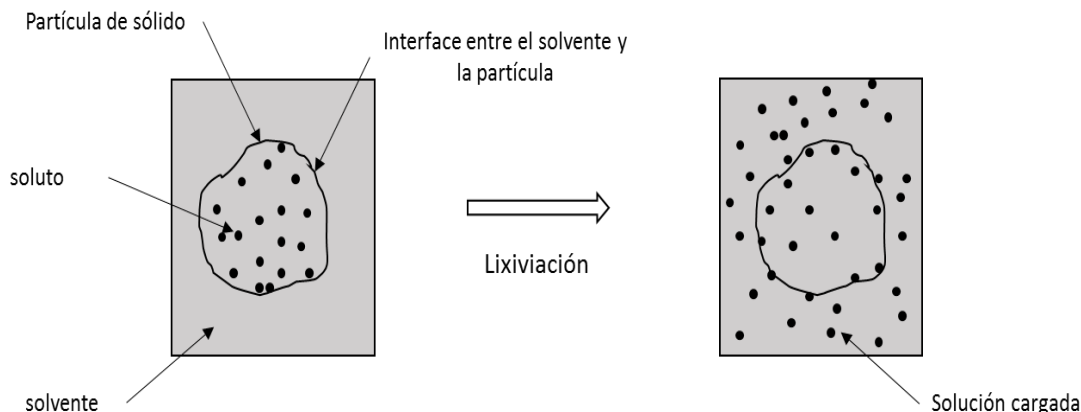


cobre, hierro, estaño, oro y plata, cuando éstos se encuentran en tenores elevados, teniendo como ventajas el procesamiento de grandes cantidades de mineral en una sola etapa. Sin embargo, en las menas los metales se encuentran, la mayoría de veces, asociados a fases minerales en formas de sulfuros, arsenitos y arseniatos y fases que contienen plomo entre otras, dependiendo de la mena extraída. Como el proceso se lleva a cabo a temperaturas altas, se generan gases que regularmente son expulsados hacia el ambiente. Estos gases son principalmente dióxido de azufre, monóxido de carbono, bióxido de carbono, plomo, óxidos nitroso y arsénico, entre otros; los cuales son nocivos para la salud (Hoffmann, 1992).

### **2.1.2 Hidrometalurgia**

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales, utilizando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas. Consiste en la disolución de valores metálicos a través de reacciones de óxido-reducción y complejación; es decir, los iones metálicos son separados de la matriz mineral formando complejos estables dentro de la solución, para su posterior recuperación por otros métodos físicos o químicos (Andrews, 2009).

Una de las principales etapas de la hidrometalurgia es la lixiviación, en la cual se extrae un soluto a partir de un sólido (mineral) mediante el uso de un solvente líquido que contiene por lo menos un agente lixivante. Ambas fases se encuentran en contacto íntimo y el soluto puede disolverse desde el sólido a la fase líquida, lo que genera la separación de los componentes originales del mineral (Sheng, 2007). En la Figura 2.1 se muestra el mecanismo de la lixiviación, la cual consiste en la remoción o extracción de un componente soluble (soluto) contenido en un sólido mediante un solvente apropiado.



**Figura 2. 1 Lixiviación (Extracción sólido-líquido)**

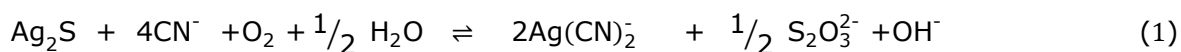
## 2.2 Agentes Lixiviantes

Los agentes lixiviantes comúnmente utilizados en este tipo de procesos para la extracción de oro y plata son el cianuro, haluros, tiourea, tiosulfato, entre otros. En el presente trabajo se describirán brevemente los procesos con cianuro y tiourea por ser los que se desarrollan en éste.

### 2.2.1 Lixiviación con Cianuro

La lixiviación de oro y plata con cianuro ha sido uno de los procesos predominantes para la recuperación de estos metales de fuentes minerales por más de 100 años, debido a su gran eficiencia y costos relativamente bajos (Hilson, 2005). Más del 18% de la producción de total de cianuro es utilizada en operaciones de minería en el mundo para la recuperación de oro y plata.

Luna y Lapidus (2000) estudiaron la cinética de la extracción de plata a partir de sulfuro de plata en el proceso de cianuración; los autores concluyeron que las reacciones de óxido-reducción y complejación se llevan a cabo simultáneamente y se representan en la ecuación 1.



Este proceso, pese a que es el más utilizado en todo el mundo, presenta varias desventajas, de las cuales se pueden enumerar las siguientes (Hilson, 2005):

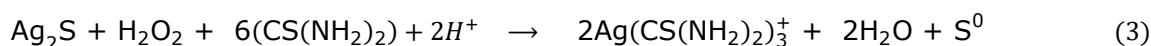
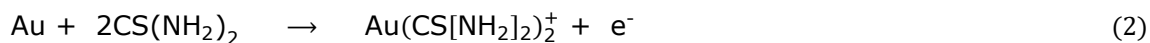
1. La cinética de oxidación-reducción es lenta
2. Ambientalmente presenta una alta toxicidad
3. Es ineficaz ante minerales refractarios
4. El consumo de cianuro es alto cuando existen diferentes especies que son cianiciadas, por ejemplo, cobre, hierro o material carbonáceo.

### **2.2.2 Lixiviación con Tiourea**

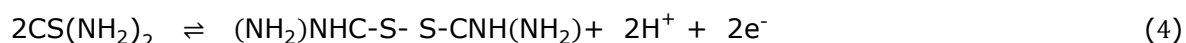
La tiourea es otro de los agentes lixiviantes que han sido considerados actualmente para la recuperación de oro y plata. En condiciones ácidas, la tiourea disuelve estos metales formando complejos catiónicos. La reacción es rápida y se pueden obtener recuperaciones arriba del 95% para oro y plata. Este proceso presenta algunas ventajas sobre el proceso de cianuración las cuales se enlistan a continuación (Örgül, 2002).

1. Se tiene altas tasas de recuperación.
2. Menos toxicidad comparada con el sistema de cianuro.
3. Es eficaz cuando se trata de minerales refractarios porque lixivia los valores de manera directa, al contrario de la lixiviación con cianuro en la que se requiere de una pre-oxidación para transformar las fases refractarias o encapsulantes a otras que se lixivian más fácilmente.
4. La reacción es rápida, aproximadamente de 8 h.
5. Es altamente selectivo.
6. Cabe la posibilidad de recircular y regenerar la solución lixivante, ya que los otros metales, productos de reacciones secundarias no la contaminan.

Las reacciones 2 y 3 mostradas a continuación, son representativas del proceso de lixiviación con tiourea en medio ácido y con peróxido de hidrógeno como agente oxidante (Luna, 2000).



Como la lixiviación con tiourea se lleva a cabo en medio ácido, permite el uso de oxidantes fuertes como el peróxido de hidrógeno y el ion férrico, formándose como producto de la oxidación de la tiourea el disulfuro de formamidina (DSMA), que es el agente oxidante para la lixiviación (Jinshan, 2007). La reacción 4 muestra el mecanismo por el cual se lleva a cabo la formación del disulfuro de formamidina.



Los parámetros que pueden afectar la lixiviación con tiourea son:

- i. La concentración. En la mayoría de las investigaciones se ha demostrado que hay una relación directa entre la concentración de la tiourea y la cantidad de metal extraído como lo refiere (Murthy, 1996) quien estudió la lixiviación de oro y plata por medio del proceso Miller con agentes lixiviantes no cianurados.
- ii. También se ha encontrado que la velocidad de reacción de oro y plata es de primer orden con respecto a la concentración de tiourea.
- iii. Valores de pH por encima de 4 y por debajo de 1 fomentan una descomposición irreversible de la tiourea. Controlando este parámetro, así como el potencial redox, se puede disminuir el consumo y descomposición de la tiourea.
- iv. Hay una relación directa entre la temperatura y el consumo de tiourea, lo que hace desventajoso un incremento de esta variable durante el proceso.

---

## 2.3 Métodos de Lixiviación

Los métodos de lixiviación corresponden a la forma en cómo se pone en contacto la solución lixivante con los minerales o menas con contenidos metálicos de interés. Los métodos más conocidos son los siguientes:

1. Lixiviación in situ
2. Lixiviación en botaderos
3. Lixiviación a presión
4. Lixiviación por agitación

Estos tipos de lixiviación pueden aplicarse de forma muy eficiente a la mayoría de los metales que están contenidos en los minerales, tales como el cobre (minerales sulfurados y oxidados), oro (nativo), plata (nativa, compuestos sulfurados), aluminio (óxidos y sulfuros) y ciertas fases de cobalto, zirconio, hafnio, etc. En el presente trabajo, el método de interés será enfocado hacia la lixiviación por agitación, que es uno de los métodos más utilizados industrialmente.

### 2.3.1 Lixiviación por agitación

En muchos procesos industriales la agitación es una operación clave, ya que es empleada para incrementar la transferencia de calor y masa, haciendo más eficiente el procesamiento químico y otras aplicaciones.

Existen diversas funciones de procesamiento que se llevan a cabo en tanques agitados mediante impulsores giratorios, algunos ejemplos son:

1. Mezcla de líquidos miscibles
2. Contacto o dispersión de líquidos no miscibles

3. Dispersión de un gas en un líquido
4. Mejora de la transferencia de calor entre el líquido agitado y la superficie de intercambio de calor
5. Suspensión o dispersión de partículas sólidas en un líquido para producir uniformidad, fomentar la transferencia de masa (como la dilución) o iniciar una reacción química
6. Reducción del tamaño de partículas aglomeradas

La lixiviación en tanques agitados se emplea cuando se tratan minerales de alta ley, teniendo pequeños volúmenes de mineral que no pueden ser tratados por otro método como el de percolación. El método de lixiviación por agitación requiere de burbujeo o agitación mecánica para mantener la pulpa en suspensión hasta que se completa la disolución (Buerhend, 2010). Actualmente en la industria metalúrgica se utilizan tanques agitados provistos de impulsores de flujo axial, impulsores de 3 o 4 aspas inclinadas, en el cual solo se mantiene la pulpa en movimiento y los sólidos en suspensión, con lo que se logra el contacto entre las partículas del mineral y solvente. Con el fin de mejorar el proceso de lixiviación, en el presente trabajo se propone utilizar impulsores de alto corte para incrementar el contacto entre el mineral y la solución lixivante.

En la literatura se han informado sobre diferentes configuraciones para los tanques agitados, de acuerdo a los requerimientos de la mezcla. Debido a esa variedad, necesidad y objetivos de procesamiento, se han desarrollado distintos tipos de impulsores, mismos que se pueden clasificar de acuerdo al patrón de flujo en las aplicaciones y geometrías especiales. Por ejemplo, los impulsores de flujo axial son eficientes para mezclar líquidos y sólidos en suspensión, mientras que los de flujo radial son más utilizados para la dispersión de gases (Buerhend, 2010).

## 2.4 Tipos de Impulsores

Los impulsores utilizados industrialmente se pueden clasificar en tres tipos, de acuerdo al ángulo que forman las aspas o paletas con el plano de rotación del impulsor y al flujo predominante que producen. Esta clasificación puede verse en la Tabla 2.1.

Tabla 2. 1 clasificación de los diferentes impulsores utilizados en la industria de acuerdo a su clase y tipo (Arrieta, 2012)

Clase	Tipo de Impulsor
Flujo axial	paletas, turbinas de cuchillas inclinadas
Flujo radial	impulsor de aspas planas, turbina de disco
Alto Corte	discos, barras
Especiales	impulsor curvado, impulsor de resorte

### 2.4.1 Impulsores de Flujo Axial

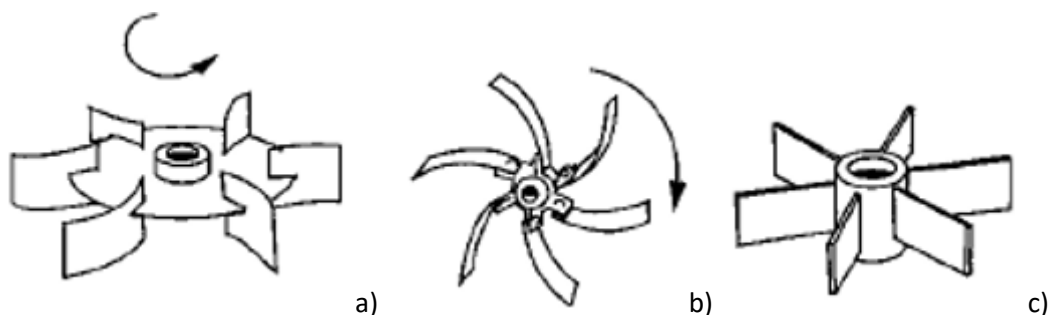
Los impulsores de flujo axial (Figura 2.2) generalmente se emplean para diferentes mezclas, tales como suspensión o incorporación de sólidos, inducción de gas y transferencia de calor. El impulsor más antiguo de flujo axial es la hélice marina, que se usa a menudo como un mezclador con ingreso lateral en grandes tanques y con ingreso superior en tanques pequeños. Se puede diseñar con un paso diferente de alabe para cambiar la combinación de bombeo y potencia. Debido a su fabricación por moldeo, una hélice se vuelve muy pesada cuando es grande (Arrieta, 2012).



**Figura 2. 2 Impulsores de flujo axial; a) turbina de aspas inclinadas, b) hidrofoil de 3 aspas y c) propela marina.**

### 2.4.2 Impulsores de flujo radial

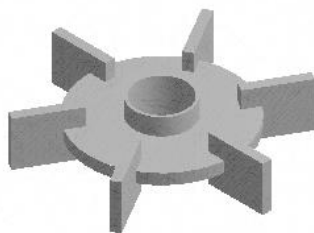
De la misma forma que en los impulsores de flujo axial, los de flujo radial como los esquematizados en la Figura 2.3 son comúnmente utilizados en fluidos de baja a media viscosidad, aunque estos pueden ser usados para cualquier fluido mono o multifásico siendo muy efectivos para sistemas gas-líquido y líquido-líquido. Comparados con los impulsores de tipo axial, ofrecen altos esfuerzos cortantes y niveles de turbulencia con poca potencia. Esta clase de impulsores descargan el flujo de manera radial hacia las paredes del recipiente. Algunas aplicaciones típicas con esta clase de impulsores están presentes en el tratamiento de procesamiento de fibras y desperdicios (Arrieta, 2012).



**Figura 2. 3 Impulsores de flujo radial; a) curva abierta con disco, b) curva abierta y c) turbina de cuchillas planas.**

De los impulsores de flujo radial, el más utilizado en la industria es la turbina de disco con paletas planas TR (turbina Rushton, mostrada en la Figura 2.4). Por ser el más estudiado y caracterizado por varios investigadores, se toma como referencia de comparación en el estudios y caracterización de otros impulsores como los de alto corte (Ramírez, 2015).





**Figura 2. 4 Impulsor de flujo radial (turbina Rushton)**

### 2.4.3 Impulsores de Alto Corte

Los impulsores de alto corte (HSI por sus siglas en inglés) son usados para la dispersión de una segunda fase (gas, líquido, sólido) en un medio líquido. Éstos comúnmente son operados a altas velocidades en la dispersión de pigmentos y en la creación de emulsiones. Los HSI presentan bajas capacidades de bombeo, por lo que son usados de manera paralela con impulsores de flujo axial para lograr con esto un alto corte, así como una distribución homogénea (Ramírez, 2015). Pueden ser utilizados en tanques sin baffles para su operación en el régimen laminar, y en tanque con baffles si operan en el régimen turbulento. En la Figura 2.5 se pueden observar modelos de dos impulsores de alto corte utilizados actualmente en la industria de pigmentos.



**Figura 2. 5 Impulsores de alto corte a) impulsor Hock-2A y b) disco Norstone (NR).**

Los HSIs proporcionan alto cizallamiento en los aglomerados de partículas, por lo que en un sistema mineral se podría mejorar el porcentaje de extracción de los metales de interés. Un caso similar en industria fue estudiado por Ramírez-

Gómez y col. (2015), donde los autores observaron la formación de aglomerados de partículas de pigmentos y utilizaron impulsores HSI. Los autores establecieron que al inyectar mayor energía disipada localizada se mejora los procesos de dispersión de partículas. Este tipo de aglomeración también es común en los minerales sin concentrar, razón por la cual en el presente trabajo se utilizaron impulsores HSI para el proceso de lixiviación de minerales de baja ley en tanque agitados.

## **2.5 Mecánica de Fluidos Computacional**

En los últimos años, el desarrollo de la tecnología de dinámica de fluidos computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics, por sus siglas en inglés), ha dado pauta a nuevos avances en la investigación y aplicación de códigos CFD en hidráulica, ingeniería química, marítima, aeronáutica, energía, irrigación y drenaje por mencionar algunas (Lorezini, 2012).

La dinámica de fluidos computacional, tiene gran importancia en el diseño y optimización de procesos de mezcla; sin embargo, debido a la complejidad del comportamiento de los fluidos, la solución de los modelos que gobiernan los fenómenos representa un desafío desde el punto de vista computacional. En los últimos años, el desarrollo de mayor capacidad de cómputo y la disminución de los costos de estos equipos ha provocado un auge en el desarrollo de la CFD. Aunado a lo anterior, en la literatura existe una gran cantidad de modelos para aproximar de manera adecuada el flujo existente en el régimen turbulento.

### **2.5.1 Modelos de Turbulencia**

En la práctica, casi todos los flujos que interesan a los científicos e ingenieros son turbulentos. La turbulencia se define como un fenómeno de inestabilidad intrínseca del flujo y provoca que éste se comporte de manera caótica, generándose torbellinos arbitrariamente.

Una representación matemática adecuada de los flujos de los fluidos, incluyendo flujos turbulentos, son las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad. Sin embargo, la resolución de estas ecuaciones es compleja y se requiere de una discretización temporal y de una malla de cálculo tan detallada que en la práctica resulta inviable implementar. Por ello comúnmente en aplicaciones reales, se acostumbra a promediar temporalmente las ecuaciones de Navier-Stokes.

### *Ecuación de Continuidad*

La ecuación de continuidad (ecuación 5) se desprende del principio de conservación de la masa, la cual describe el flujo de masa neto saliendo del volumen de control (vc) a través de sus fronteras.

$$\nabla \cdot \vec{v} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

### *Ecuación de Cantidad de Movimiento*

Esta ecuación es la representación de la segunda ley de Newton, la cual establece que el incremento temporal del momento lineal en el volumen de control (vc), más el flujo neto de momento lineal de salida, debe ser igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre dicho volumen (ecuación 6).

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (6)$$

los modelos básicos que se utilizan actualmente varían en complejidad desde simples coeficientes de viscosidad ajustados hasta sistemas completos de ecuaciones adicionales. Algunos de ellos se mencionan a continuación.

1. Las ecuaciones del modelo se obtienen promediando las ecuaciones de movimiento en el tiempo sobre una coordenada, en el cual el flujo medio no varía. Esta aproximación se le llama cerradura de un punto y produce un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales llamadas ecuaciones de Navier Stokes promediadas de Reynolds (RANS, Reynolds Averaged Navier Stokes), estos a su vez se clasifican en  $\kappa$ - $\varepsilon$  standard, realizable y  $\omega$ - $\varepsilon$  entre otros.
2. La segunda categoría de los modelos de turbulencia corresponde a la simulación de remolinos grandes (LES, Large Eddy Simulation) la cual resuelve los movimientos de las escalas más grandes del flujo, mientras se aproxima a escalas pequeñas.
3. Finalmente está el modelo de simulación numérica directa (DNS, Direct Numerical Simulation), las ecuaciones de Navier Stokes se resuelven para todas las escalas de movimiento en flujo turbulento.

Todos los modelos mencionados incluyen coeficientes que hay que ajustar para cada tipo de flujo y que habitualmente se obtienen por medio de la experimentación (Ramírez, 2015).

### **2.5.2 Modelo de turbulencia $\kappa$ - $\varepsilon$ standard**

Delgon y Meyer (2006) llevaron a cabo estudios sobre el modelado de tanques agitados a través del modelo de turbulencia y sliding mesh, llegando a la conclusión, que, aunque el modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  sliding mesh es el más completo para un flujo en estado estacionario el modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  puede dar buenos resultados con poco

error en comparación con el sliding mesh. A continuación, se da una breve explicación del modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  standard, que es que se utilizará en este trabajo.

El modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  es un modelo semi-empírico basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta ( $\kappa$ ) y para la disipación de la energía turbulenta ( $\varepsilon$ ). En su derivación se supone que el flujo es totalmente turbulento e isotrópico y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables, por lo tanto, es válido solo para flujos turbulentos. A continuación, se presentan las expresiones matemáticas que lo componen.

Energía cinética turbulenta ( $\kappa$ )

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_\kappa \quad (7)$$

Disipación de la energía cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ).

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon \quad (8)$$

Donde  $G_\kappa$  representa la generación de energía cinética turbulenta debido al gradiente de velocidad,  $G_b$  es la generación de energía cinética turbulenta debido a las fuerzas de flotación,  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta, los términos  $C_{1\varepsilon}$  y  $C_{2\varepsilon}$  son constantes, mientras que  $\sigma_\kappa$  y  $\sigma_\varepsilon$  son los números de Prandtl turbulentos para las ecuaciones de  $\kappa$  y  $\varepsilon$  respetivamente.  $Y_M$  es la contribución de fluctuación de la dilatación en la turbulencia compresible debida a la tasa de disipación.

### 2.5.3 Parámetros que caracterizan la hidrodinámica en tanques agitados

En el diseño de tanques agitados se requiere de ciertos parámetros que proporcionan información sobre el desempeño del impulsor, algunos de los cuales se mencionan a continuación.

#### *Numero de Reynolds*

Es un parámetro adimensional, el cual se calcula a través de la ecuación 9. Este número adimensional relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas del fluido en movimiento.

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad (9)$$

Donde  $N$  y  $D$  son velocidad rotacional y el diámetro del impulsor respectivamente,  $\rho$  y  $\mu$  son propiedades del fluido de trabajo (densidad y viscosidad dinámica).

De acuerdo con los valores calculados del  $Re$  se puede determinar si un flujo es laminar o turbulento

En flujo laminar  $Re < 10$

En régimen turbulento  $Re > 10^4$

#### *Numero de Potencia*

El consumo de potencia de un fluido durante el proceso de agitación, puede verse como la disipación de energía mecánica proveniente del impulsor, la cual es debida a la fricción entre las capas del fluido. En estado estacionario, la potencia suministrada por el impulsor es igual a la potencia consumida por el fluido. El consumo de potencia por los agitadores en tanques con fluidos

newtonianos se puede predecir con gran exactitud a partir del número de potencia. Este número adimensional forma parte de las correlaciones que son útiles para describir la hidrodinámica de un tanque agitado mecánicamente y se expresa de la siguiente manera (Ramírez, 2015).

$$N_p = f(Fr, Re, \text{relaciones geométricas simples}) \quad (10)$$

Donde  $N_p$  es el número de potencia y  $Fr$  es el número de Froude. Si se conserva similitud geométrica, todos los términos referidos a las relaciones geométricas se pueden considerar constantes, entonces simplificando la ecuación.

$$N_p = f(Fr, Re) \quad (11)$$

Esta simplificación permite evaluar los números adimensionales de la ecuación (11), si los números  $Fr$  y  $Re$  se mantienen constantes.

El número de Froude relaciona las fuerzas inerciales con la fuerza de gravedad, y se expresa de la siguiente forma (Ramírez, 2015).

$$Fr = \frac{N^2 D}{g} \quad (12)$$

En estudios hidrodinámicos se ha demostrado que, en tanques agitados equipados con baffles, el  $Fr$  puede ser despreciado debido a que en régimen turbulento no hay efecto de la gravedad sobre el fluido, ya que los baffles impiden un movimiento circular evitando la formación del vórtice.

La potencia consumida por el impulsor puede obtenerse por:

$$P = N_p \rho N^3 D^5 \quad (13)$$

### *Numero de Bombeo*

El tercer grupo adimensional es  $N_Q$ , el cual se puede deducir de la siguiente manera.

$$Q = N_Q N D^2 \quad (14)$$

En general el flujo inducido por el impulsor se expresa como la capacidad de bombeo normal al plano de descarga de un impulsor ya sea de flujo radial o axial, es decir, es el flujo que sale de la superficie del impulsor la cual se debe a la geometría de éste.

Puede notarse de la revisión del Estado del Arte que existe poca información relacionada a los efectos en la agitación de minerales, por lo que en el presente trabajo se analiza el desempeño de dos impulsores uno convencional y otro de alto corte, para lo cual en la siguiente sección se plantean los objetivos.



## Capítulo 3

### Objetivos

---

La lixiviación de oro y plata con cianuro es uno de los métodos más empleados en la industria de la minería en casi todo el mundo. Sin embargo, debido a las desventajas que se mencionaron anteriormente, es necesario establecer alternativas que las contrarresten, con este fin en el presente trabajo se propone el uso de tiourea en medio ácido como agente lixivante; además del uso de impulsores de alto corte en tanques agitados para mejorar la velocidad de extracción de plata.

#### 3.1 Hipótesis

La obtención de metales preciosos contenidos en minerales de baja ley, puede ser mejorada a través de procesos de tioureación en reactores convencionales (tanque agitado) con agitadores de alto corte.

#### 3.2 Objetivo General

Determinar los parámetros termodinámicos y de disipación de energía en el modelado de la lixiviación de minerales de baja ley utilizando reactores convencionales.

##### 3.2.1 Objetivos Particulares

- Establecer los parámetros físico-químicos más importantes en el sistema, aplicando los diagramas de zonas de predominio.

- Determinar los parámetros involucrados en la disipación de energía en la lixiviación en tanques agitados, a través del modelado hidrodinámico, utilizando una turbina Rushton y un impulsor de alto corte (Norstone).
- Comparar los parámetros de mezclado obtenidos mediante el modelado hidrodinámico, con los resultados experimentales obtenidos con los impulsores mencionados en el objetivo anterior, con el fin de determinar el mejor sistema de agitación para la lixiviación de metales preciosos en tanques agitados.

# Capítulo 4

## Metodología

---

Para esta investigación la metodología se divide en dos secciones, una experimental y otra numérica.

### 4.1 Metodología Experimental

La metodología experimental se dividió en cuatro etapas; en la primera se construyeron los diagramas termodinámicos con la finalidad de establecer las condiciones a las cuales se realizaría la lixiviación. En la segunda etapa se desarrollaron las pruebas de lixiviación para determinar los porcentajes de plata extraída del mineral refractario a nivel microscópico; en la tercera se tomaron muestras sólidas para realizar tanto el análisis químico como el morfológico, utilizando un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Varian 220 FS, y un Microscopio Electrónico de Barrido, modelo Supra VP. Finalmente se realizaron lixivaciones a nivel macroscópico empleando la turbina Rushton y el disco Norstone.

#### 4.1.1 Termodinámica de la Tioureación

En los sistemas acuosos hidrometalúrgicos, es importante conocer el comportamiento termodinámico a condiciones de concentración, pH y potencial específicos. Para efectos de su interpretación se cuenta con los diagramas de zonas de predominio, los cuales sirven para representar los equilibrios heterogéneos, entendiendo que el sistema está en condiciones de estabilidad y describen teóricamente las reacciones de oxidación, reducción y de hidrólisis que ocurren en las soluciones acuosas.

Como punto de partida se procedió a realizar un diagrama de zonas de predominio utilizando el programa MEDUSA, con el fin de especificar las condiciones a las cuales se debe trabajar el sistema.

En este caso el sistema analizado es Tu-Ag-S (tiourea, plata y azufre) que son los principales componentes del mineral y agente lixivante de los experimentos desarrollados en esta investigación.

#### 4.1.2 Lixiviaciones a nivel micro y macroscópico

Las lixiviaciones a nivel microscópico se llevaron a cabo en un reactor de 500 ml con agitador magnético a temperatura ambiente. El mineral utilizado proviene de Fresnillo, Zacatecas, comúnmente llamado Fresnillo-Zn. El tamaño de partícula empleado para la experimentación se encuentra entre las mallas - 200 y +300 (74-48  $\mu\text{m}$ ). En la tabla 4.1 se muestra la composición inicial del mineral, la cual se obtuvo mediante una digestión con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). Con el fin de que hubiese homogeneidad en las partículas de mineral y reproducibilidad en las lixiviaciones, se realizó un cuarteo para cada muestra tomada.

Tabla 4. 1 Composición inicial del mineral Fresnillo-Zn

Metal	kg/ton <sub>min</sub>
Ag	66.08
Cu	7.813
Pb	274.410
Zn	110.000
Fe	80.000

Se llevaron a cabo las lixiviaciones del mineral con una solución de 0.4 M tiourea y 0.1 M peróxido de hidrógeno, ajustando el pH de la solución en un valor entre 1 y 2 con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y temperatura de 25°C, con el fin de evitar la

descomposición de la tiourea, debido a que en la literatura se ha informado que la tiourea se descompone a valores de pH menores a 1 y mayores a 2, así como con temperaturas mayores a 40°C. La densidad de pulpa en los experimentos fue establecida en 10, 20 y 50% en sólidos con el objetivo de determinar en cuál de estas se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de plata. Las condiciones de temperatura y presión fueron las atmosféricas.

La variación de la concentración de plata en la solución durante las lixiviaciones, fue monitoreada mediante la toma de muestras a distintos tiempos establecidos, para posteriormente ser analizadas en un Espectrómetro de Absorción Atómica (EAA, equipo que pertenece a UAM-I), marca Varian modelo spectrAA 220 FS.

Por otro lado, con el fin de obtener un balance metalúrgico del sistema, una vez terminada la lixiviación, se filtró la solución del sólido, mismo que se dejó secar para posteriormente, disolverlo y analizarlo por EAA.

Una vez determinados los resultados a nivel micro, se lixivió el mineral en un tanque agitado equipado con los impulsores seleccionados anteriormente, a las mismas concentraciones de tiourea y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (ver Tabla 4.2). Se tomaron muestras a diferentes tiempos y al igual que en las lixiviaciones a nivel microscópico, también se analizaron en el EAA.

Tabla 4. 2 valores de las concentraciones utilizadas en las lixiviaciones

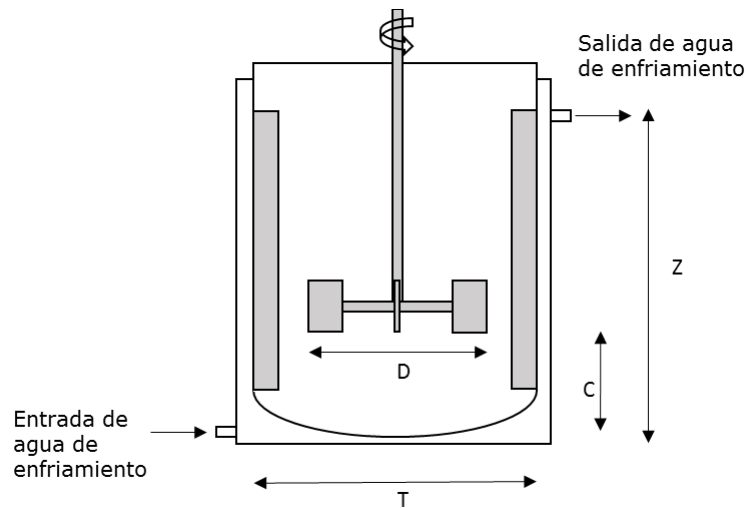
Componente	Concentración
Tiourea	0.4 M
$\text{H}_2\text{O}_2$	0.1 M
$\text{H}_2\text{SO}_4$	0.25 M

Para las lixiviaciones a nivel macroscópico se utilizó un equipo de agitación Dispermat® tipo AE01 (Figura 4.1), que puede ser operado a una velocidad máxima de 10,000 rpm, los valores experimentales de potencia pueden visualizarse directamente en la pantalla del equipo.



**Figura 4. 1 Equipo de agitación Dispermat® tipo AE01**

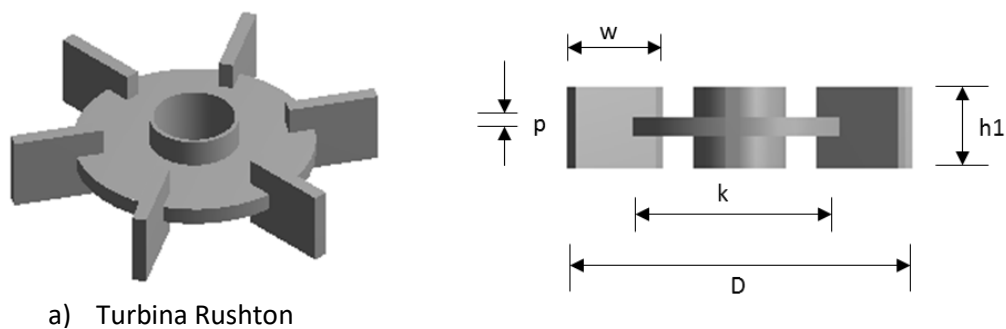
Los experimentos se realizaron en un tanque cilíndrico con fondo toriésferico de acero inoxidable, el cual cuenta con una camisa de enfriamiento, aislado en el exterior con una capa de 10 mm de poliestireno expandido y con 4 deflectores equiespaciados en el interior del tanque y con un diámetro de 132 mm, como se muestra en la Figura 4.2, con el fin de mantener la temperatura del fluido constante a 25°C se utilizó un baño de enfriamiento con recirculación en todos los experimentos.

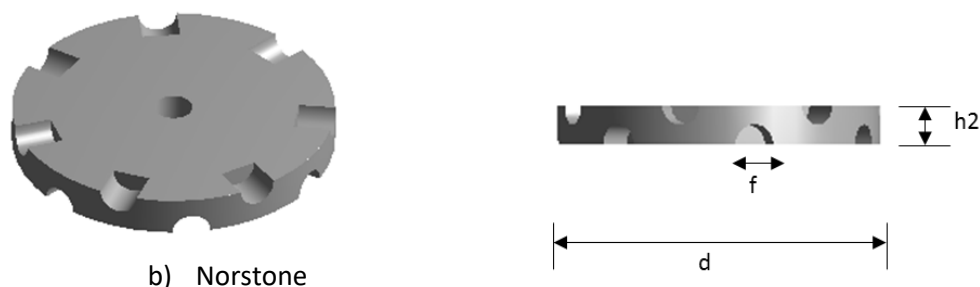


**Figura 4. 2 Diagrama de la instalación experimental**

Las relaciones geométricas adimensionales correspondientes a la distancia del fondo del tanque al centro del impulsor ( $C$ ), la altura del líquido ( $Z$ ) y el diámetro del impulsor que se usaron fueron:  $C/T = 0.3848$ ,  $Z/T = 1$  y  $D/T = 0.3848$ , respectivamente.

Los impulsores utilizados para fines de la experimentación en esta investigación fueron una turbina Rushton (turbina de 6 paletas planas) y un disco Norstone (Figura 4.3), los detalles de sus dimensiones se muestran en la Tabla 4.3





**Figura 4. 3 planos a escala de los impulsores utilizados**

El volumen de pulpa en el tanque fue de 1.875 l correspondiente a la mezcla solución de tiourea-mineral, es decir 20% en sólidos.

Tabla 4. 3 Dimensiones de los impulsores en mm

Turbina Rushton		Disco Norstone	
Símbolo	Dimensiones (mm)	Símbolo	Dimensiones (mm)
p	2.4	f	6
w	12.5	l*	6
k	33.2	h2	6
D	50.8	d	50.8
h1	10.2		

\* l es la longitud correspondiente a la muesca en el disco Norstone

Se midió la densidad del mineral con un picnómetro de 10.199 ml la cual arrojó una densidad de 1.6 g/ml y la viscosidad son un equipo Brookfield digital viscosimeter DV-E con un valor de 1.4 cp.

Finalmente se realizaron 2 lixivaciones, una a nivel microscópico con cianuro que es el lixiviante convencional más utilizado en la industria hidrometalúrgica. Las concentraciones utilizadas para este experimento se presentan en la Tabla 4.4.



Tabla 4. 4 concentración de compuestos para la lixiviación con cianuro, una densidad de pulpa del 20% en sólidos, la solución se llevó a un pH de 10.5

Componente	Concentración
NaCN	0.05 M
NaOH	0.01 M

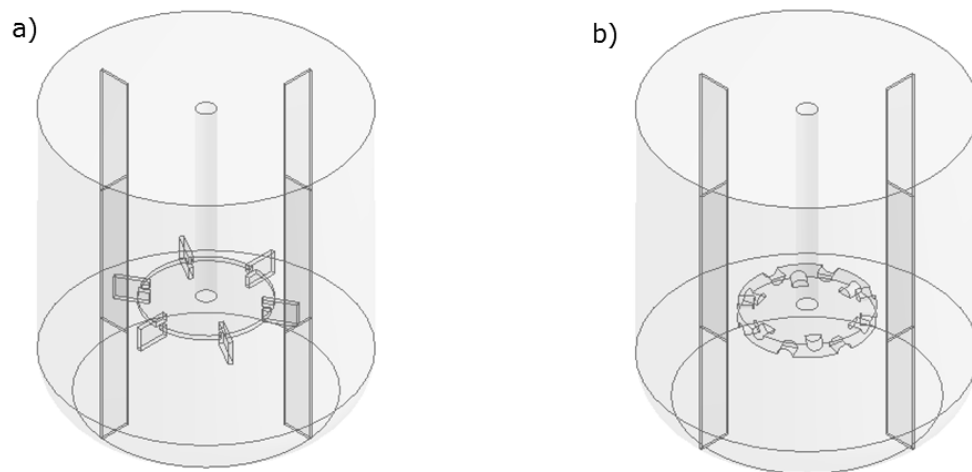
La segunda lixiviación se realizó con tiourea, aplicando ultrasonido como sistema de agitación, a una frecuencia de 60% y ciclo completo (100%). Las concentraciones de los componentes de la solución lixivante son las mismas que se utilizaron en las lixivitaciones anteriores con tiourea y mostradas en la Tabla 4.2. Cabe mencionar que estas pruebas se realizaron con el fin de establecer un parámetro de comparación es cuanto al efecto de corte sobre la extracción de plata.

## 4.2 Metodología Numérica

La metodología numérica utilizando CFD consta de 4 etapas: a) la generación de la geometría del equipo utilizado (tanque agitado provisto del impulsor y un sistema de 4 baffles igualmente espaciados, b) generación de la malla de dominio computacional, c) resolución de las ecuaciones de Navier Stokes y de continuidad y d) el procesamiento de los resultados arrojados por el simulador Fluent®.

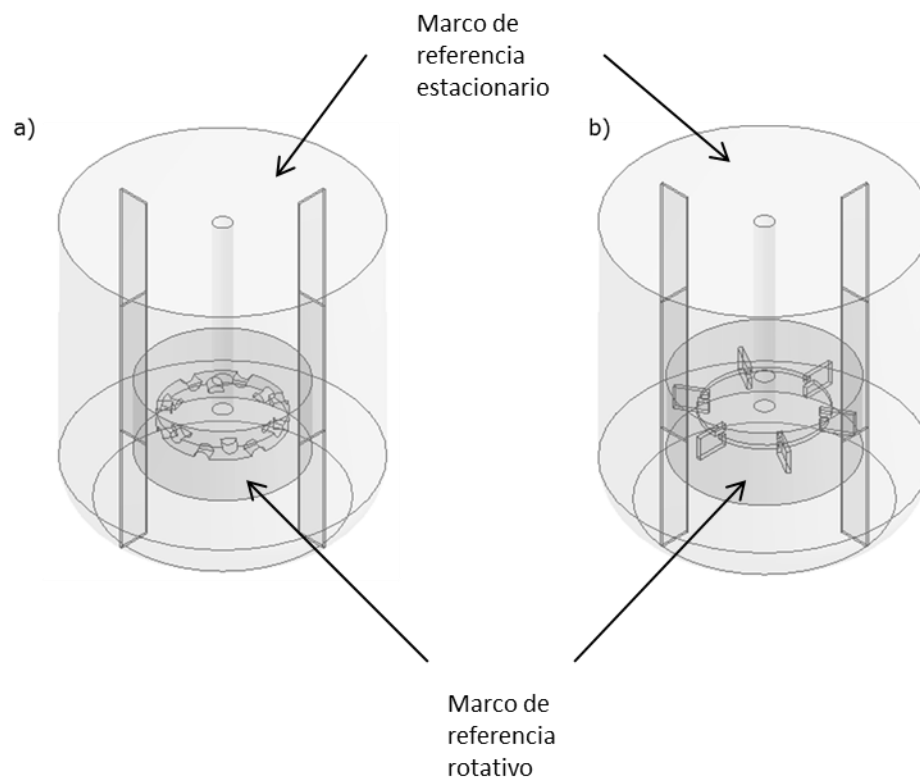
### 4.2.1 Geometría del modelo

En la Figura 4.4 se muestra la geometría del tanque y los impulsores utilizados, con las dimensiones de los experimentos realizados, mostradas en la sección experimental. Dichas geometrías se generaron en un módulo contenido en ANSYS llamado DesingModeler.



**Figura 4. 4 Geometrías en 3D de los modelos elaborados a) tanque provisto con la turbina Rushton y b) tanque provisto con el impulsor Norstone.**

De la geometría diseñada en DesingModeler el dominio fue segmentado en dos regiones principales: una que encierra al impulsor denominado marco de referencia rotativo o móvil (RRF, Rotating Reference Frame por sus siglas en ingles) y la región fuera de ésta se define en un marco de referencia estacionario (SRF, Stationary Reference Frame por sus siglas en ingles). En la Figura 4.5 se presentan estas divisiones. Así es posible implementar el método de solución MRF (Multi Reference frame por sus siglas en ingles), el cual es útil cuando en un sistema se tienen partes móviles como es el caso de tanques agitados mecánicamente.



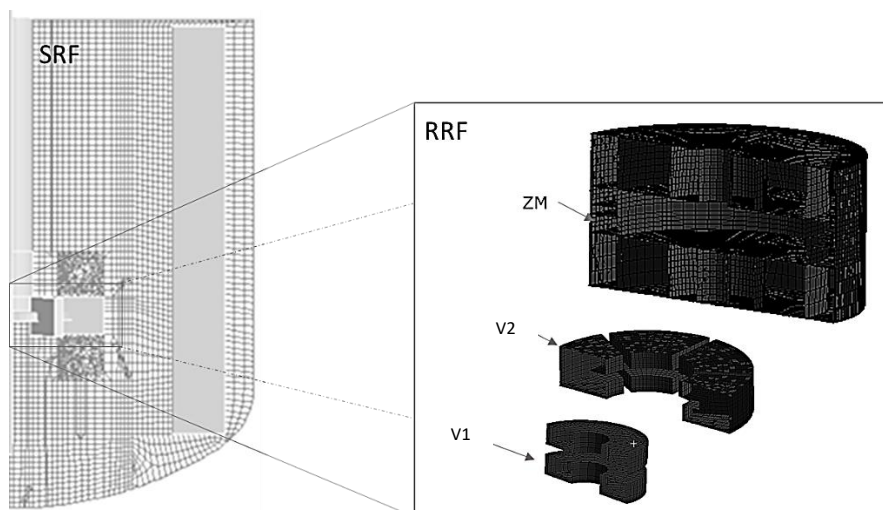
**Figura 4. 5 Segmentación del dominio tanto para la turbina Rushton (a) como para el disco Norstone (b)**

### 4.2.2 Mallado del Dominio Computacional

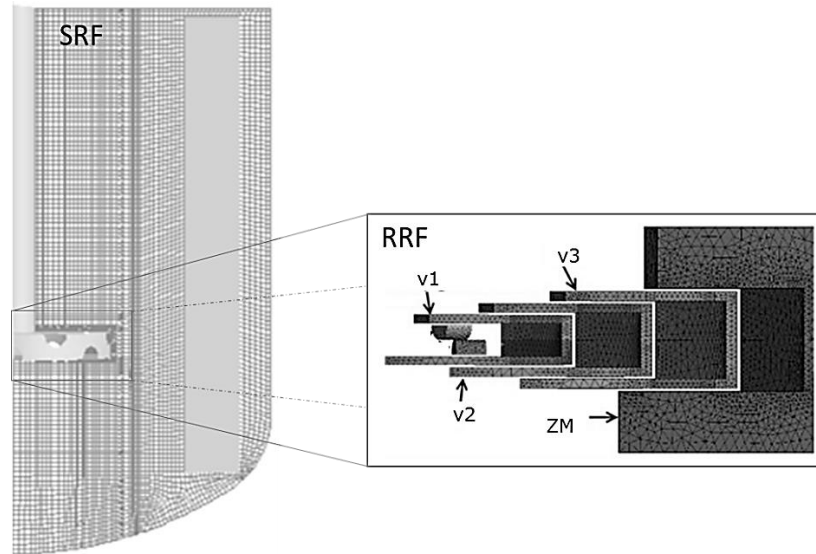
La parte más importante en el estudio de CFD es la generación de la malla computacional, esto debido a que la densidad de la malla y el tamaño de los volúmenes de control determinan la exactitud de la solución.

Después de generar la geometría adecuada para el tanque y sus accesorios, se procede a generar la malla computacional, teniendo en cuenta que ésta deberá cumplir con una oblicuidad de un valor máximo de 0.9, con el fin de evitar problemas de convergencia numérica. En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran las mallas para cada uno de los sistemas de agitación utilizados, indicando también la partición del dominio (según lo descrito en la sección 4.2.1), para definir los límites del dominio como son las paredes, el eje y el impulsor.

Además, con el fin de estudiar la tasa de disipación de energía en la cercanía de los impulsores, se definieron tres regiones más dentro de la zona RRF.



**Figura 4. 6 Malla utilizada para la simulación con la Turbina Rushton**



**Figura 4. 7 Malla utilizada para la simulación con el Disco Norstone**

#### 4.2.3 Resolución de las Ecuaciones

Una vez que se tiene la geometría con la malla adecuada, el modelo se carga en Fluent para especificar las condiciones a las cuales tiene que trabajar, por ejemplo, la elección de las ecuaciones gobernantes a resolver (modelo  $\kappa$ - $\epsilon$ ) y tener en cuenta, las consideraciones a tomar para su resolución tales como:

- Sistema isotérmico
- Estado estacionario
- Fluido newtoniano
- Flujo turbulento
- Densidad constante (flujo incompresible)
- Rotación del impulsor en sentido a las manecillas del reloj

Las simulaciones para la turbina Rushton, se llevaron a cabo a las siguientes velocidades de agitación: 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400 y 1500 rpm.

Para las simulaciones con el disco Norstone se tienen las siguientes velocidades de agitación: 1000, 1200, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100 rpm.

A continuación, se presenta los pasos, así como las especificaciones para llevar a cabo la solución del modelo en Fluent.

Para comenzar se especifican las condiciones del algoritmo que utilizará Fluent, las cuales se presentan en la Tabla 4.5

Tabla 4. 5 Especificaciones del algoritmo de solución

Tipo	Basado en la presión
Espacio	3D
Tiempo	Estacionario
Formulación de la velocidad	Absoluta

El modelo matemático correspondiente al modelo RNG que se utilizó para las simulaciones fue el modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\varepsilon$  standard, recomendado por Delgon y Meyer (2006).

El fluido utilizado en las simulaciones fue agua líquida a 25°C, las especificaciones de los materiales para la simulación se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4. 6 Especificaciones de los materiales

Nombre	Agua
Propiedades	
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	998.2
Viscosidad ( $\text{kg/m-s}$ )	0.001003
fase	Líquida

Considerando que el tanque está equipado con cuatro baffles igualmente espaciados, inhibiendo así la formación del vórtice, la contribución de la gravedad se desactivó en Fluent. Las condiciones de frontera especificadas para la simulación se muestran en las tablas 4.7 y 4.8, tanto para la turbina Rushton como para el disco Norstone.

Tabla 4. 7 Especificaciones de las condiciones de operación para el sistema de agitación con la turbina Rushton

Turbina Rushton			
Zona	tanque	impulsor	eje
Tipo	pared	pared	pared
Tipo de movimiento	no deslizamiento	rotacional absoluto	rotacional absoluto
Velocidad (rpm)	0	800 a 1500	800 a 1500
Dirección del eje de rotación			
	$x(m) = 0$	$x(m) = 0$	$x(m) = 0$
	$y(m) = 0$	$y(m) = -1$	$y(m) = -1$
	$z(m) = 0$	$z(m) = 0$	$z(m) = 0$

Tabla 4. 8 Especificaciones de las condiciones de operación para el sistema de agitación con el disco Norstone

Disco Norstone			
Zona	tanque	impulsor	eje
Tipo	pared	pared	pared
Tipo de movimiento	no deslizamiento	rotacional absoluto	rotacional absoluto
Velocidad (rpm)	0	1000 a 2100	1000 a 2100
Dirección del eje de rotación			
	$x(m) = 0$	$x(m) = 0$	$x(m) = 0$
	$y(m) = 0$	$y(m) = -1$	$y(m) = -1$
	$z(m) = 0$	$z(m) = 0$	$z(m) = 0$

Se utilizó un esquema de discretización Quick de alto orden para las ecuaciones del modelo. La resolución de las ecuaciones se realizó mediante la activación del esquema Couple, el cual resuelve las ecuaciones de movimiento y de continuidad

acopladas. Se estableció un criterio de convergencia de la solución, debido a que, tratándose de un sistema iterativo, es necesario establecer dicho criterio para detener la simulación. En este trabajo los criterios de convergencia que se establecieron son:

1. Residuales de las ecuaciones, definidos en un valor de  $1 \times 10^{-5}$
2. Torque del impulsor, variaciones en cada iteración inferiores a  $1 \times 10^{-5}$ .

Para el cálculo de los parámetros de mezclado, de los resultados de las simulaciones se obtiene la potencia, la estructura del flujo inducido por el agitador, así como contornos de la disipación de energía turbulenta en la región cercana al impulsor.

La potencia inyectada mediante los resultados de las simulaciones en Fluent se obtuvieron con el producto de la velocidad del impulsor y el torque inducido, que se obtiene mediante la integración de la presión en las paletas del impulsor como sigue:

$$P = 2\pi N M \tau \quad (15)$$

Donde  $\tau$  es el torque en Nm, obtenido de los resultados de la simulación, N es la velocidad angular del impulsor en rps. En Fluent,  $\tau$  se obtiene calculando el vector de momento total sobre un centro especificado, sumando los productos cruz de los vectores de fuerzas de presión y viscosos para cada cara del volumen de control con el vector momento desde el centro a la fuerza de origen:

$$\underbrace{\overrightarrow{M}_T}_{\text{momento total}} = \underbrace{\overrightarrow{r}_{AB} \times \overrightarrow{F}_P}_{\text{momento de presión}} + \underbrace{\overrightarrow{r}_{AB} \times \overrightarrow{F}_V}_{\text{momento viscoso}} \quad (16)$$



Donde A es el centro de momento, B es el origen de la fuerza,  $r_{AB}$  vector de momento,  $F_p$  vector fuerza de presión y  $F_v$  es el vector de fuerza viscosa.

## Capítulo 5

### Resultados

---

Los resultados son presentados en cuatro secciones.

En la sección 5.1 se muestran el Diagrama de Pourbaix construido para el sistema Ag-Tu; en la sección 5.2 se explica el comportamiento de las lixiviaciones con cianuro y tiourea, empleando una barra magnética y ultrasonido; posteriormente, el comportamiento a nivel macro, de las lixiviaciones con tiourea utilizando los impulsores tipos Rushton y Norstone. En la sección 5.3 se describe brevemente la morfología del residuo sólido de cada lixiviación, obtenida en el Microscopio de Barrido Electrónico. Finalmente, en la sección 5.4 se calculan los parámetros hidrodinámicos a partir de los resultados de las simulaciones para cada impulsor, así como la validación de las mismas con datos obtenidos experimentalmente, con el fin de comparar el desempeño de los impulsores.

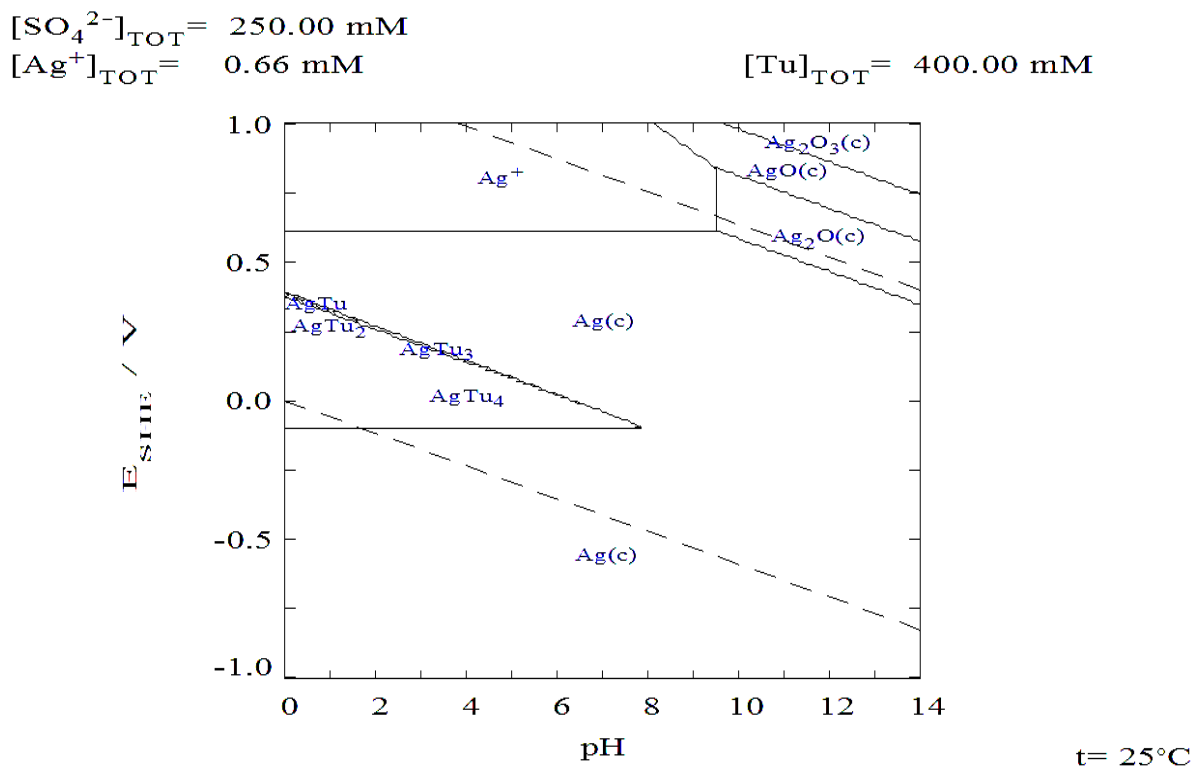
#### 5.1 Análisis Termodinámico del sistema Ag-Tu

En los minerales, el metal de interés comúnmente se encuentra distribuido en el sólido permeable o refractario y la velocidad de lixiviación está determinada principalmente por la velocidad de difusión a través del sólido (McCabe, 2007). Las especies que se forman dependen de varios factores, tales como el equilibrio redox, pH y la solubilidad de las especies metálicas, determinada por los complejantes o ligandos. Los numerosos equilibrios que se generan en un sistema son complejos, por lo que es necesario hacer uso de algún software que facilite una estrategia de representación.

Medusa es un software de distribución libre el cual minimiza la energía libre de las reacciones consideradas, permitiendo determinar la existencia y

predominancia de las especies químicas en el sistema. Con este software se pueden generar diagramas de predominio tipo Pourbaix, el cual muestra información sobre el comportamiento oxido-reductor (redox) del sistema.

En esta investigación el sistema construido fue Tu-Ag-S, el cual se representa en la Figura 5.1, a través del software de Medusa. Se puede observar que en el intervalo de pH entre 0 a 8, se encuentran solamente, las especies químicas obtenidas a las condiciones de concentración, temperatura y presión.



**Figura 5. 1 Diagrama de predominio tipo Pourbaix para el sistema Ag-Tu-S. con concentraciones de 0.4M, 0.0066M y 0.25M; para la Tiourea, Plata y Sulfato respectivamente**

En el diagrama se puede apreciar que en el intervalo de pH entre 1 y 2 (condiciones trabajadas en esta investigación), la especie que predomina es el

complejo formado  $\text{AgTu}_4^+$ , en un intervalo de potencial aproximado entre -100 a 250 mV con respecto al electrodo normal de hidrógeno. Las otras especies solubles formadas que se visualizan en el diagrama son las siguientes:  $\text{AgTu}$ ,  $\text{AgTu}_2$  y  $\text{AgTu}_3$ , aunque su región de predominancia es marginal.

## 5.2 Lixiviaciones del mineral concentrado

En una primera etapa, se realizaron pruebas con tres densidades de pulpa de 10, 20 y 50%, utilizando en cada una de ellas una solución 0.4 M de tiourea, 0.1 M de peróxido de hidrógeno y 0.25 M de ácido sulfúrico. Se mantuvo agitación constante mediante barra magnética y se tomaron muestras a intervalos de tiempo preestablecidos. Se determinó que el mayor nivel de extracción de plata, se obtuvo en la mezcla de 20% en sólidos (datos no mostrados), motivo por el que todas las pruebas subsiguientes se realizaron utilizando este valor.

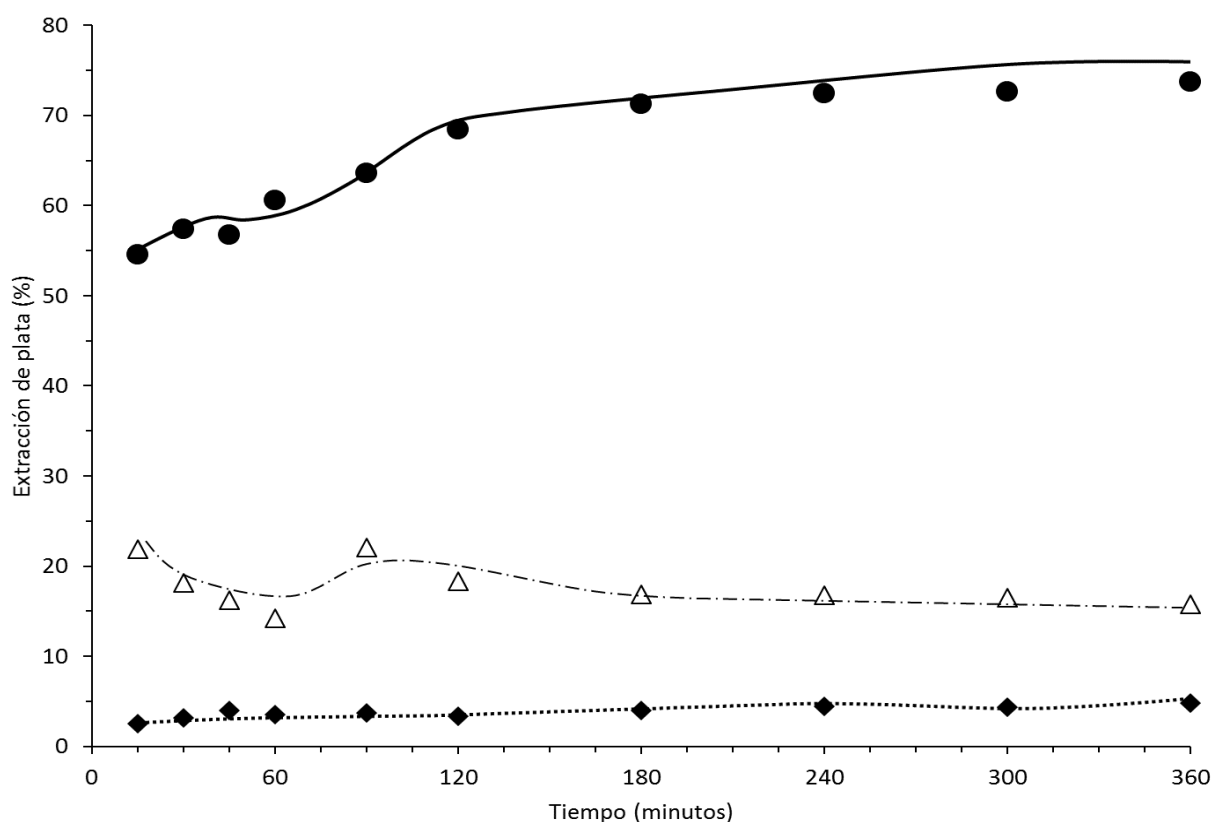
Con el fin de establecer un parámetro de comparación en cuanto al efecto del alto corte sobre la extracción de plata, en primera instancia se realizaron tres lixiviaciones a nivel micro, es decir, cada una en un volumen de reacción de 250 ml. En las dos primeras se empleó una solución 0.4 M tiourea y 0.1 M peróxido de hidrógeno a pH 2, empleando una barra magnética como agitador, con la particularidad de que, en una de estas pruebas, se aplicaron ondas ultrasónicas durante toda la lixiviación. El tercer experimento realizado al mismo volumen de reacción, fue utilizando una solución 0.05 M de cianuro a pH 10.5, agitado también mediante barra magnética sin la adición de ondas ultrasónicas.

De acuerdo a los resultados que se encuentran graficados en la Figura 5.2, el efecto de la radiación ultrasónica es notorio (marcador •), alcanzando porcentajes de extracción de plata superiores a 70% después de tres horas de lixiviación, y siendo evidente que el efecto de readsorción es nulo.

Por otra parte, el mismo sistema de tiourea sin ultrasonido, alcanza una extracción de plata máxima de 20% aproximadamente en los primeros 15 minutos; sin embargo, este valor decae lo cual se puede asociar al efecto de

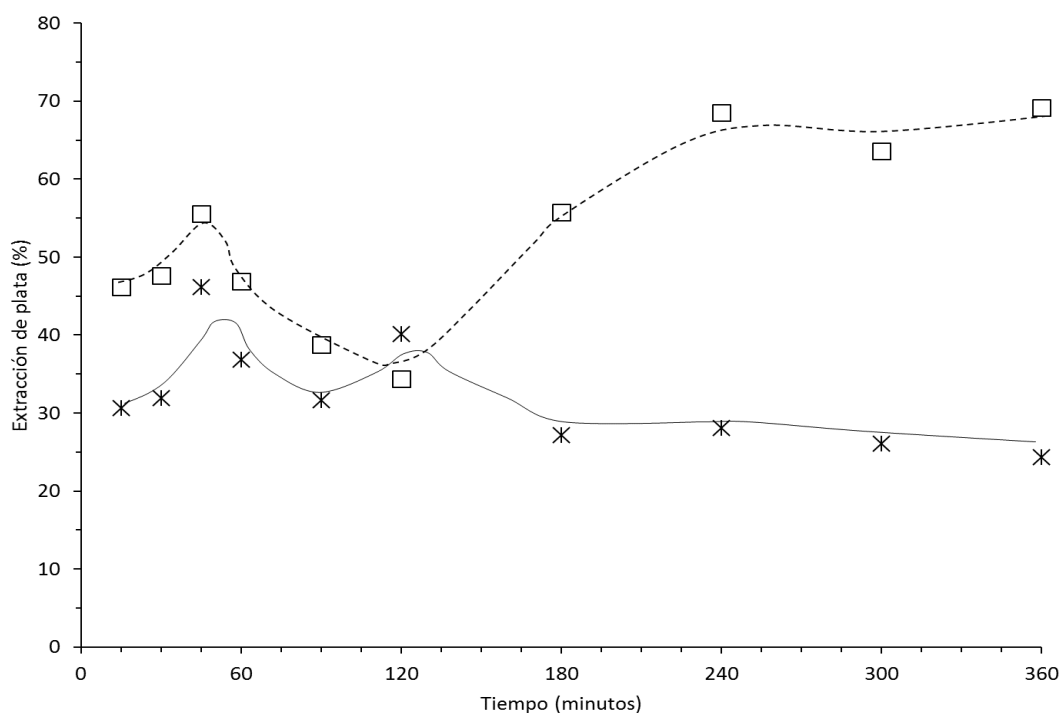
readsorción. En este experimento la extracción después de 6 horas fue de 16% tal como se aprecia en la Figura 5.2 (marcador  $\Delta$ ).

Finalmente, se sabe de la literatura que la cianuración es la más rentable para extraer metales preciosos; sin embargo, en este caso es evidente que el sistema de cianuro presenta la extracción de plata más pobre, alcanzando tan sólo un 5% aproximadamente (ver Figura 5.2, marcador  $\diamond$ ). Esto pone en evidencia el carácter refractario al cianuro que posee este mineral.



**Figura 5.2 Porcentaje de extracción de plata para las lixiviaciones realizadas en un volumen de reacción de 250 ml utilizando barra magnética como agitador. Solución 0.4 M de tiourea, 0.1M peróxido de hidrogeno y 0.25 M de ácido sulfúrico en presencia y ausencia de ondas ultrasónicas • y  $\Delta$  respectivamente. Solución 0.01 M de cianuro de sodio pH 10.5 ♦. Densidad de pulpa del 20%**

Con el fin de mejorar los porcentajes de extracción de plata del mineral utilizado, de los experimentos a nivel micro se establecieron las condiciones de lixiviación en el sistema tiourea sin radiación ultrasónica, para llevar a cabo dos diferentes experimentos en un reactor con un volumen de mezcla reaccionante de 1.875 l, empleando un disco Norstone y una turbina Rushton como agitadores. Los resultados obtenidos al utilizar el impulsor tipo Rushton, cuyos puntos experimentales están marcados con el símbolo \* en la Figura 5.3, indican que se limita la readsorción de la plata lixiviada y sólo después de 120 minutos del proceso, la concentración de este ion comienza a disminuir de forma aparentemente marginal, pasando de un porcentaje de extracción de 27% en tres horas a 24% en seis horas.



**Figura 5. 3 Lixiviaciones en tanque agitado con 1.875 l como volumen de reacción al utilizar la turbina Rushton \* y el disco Norstone □ a concentraciones de 0.4M, 0.1M y 0.25M de Tiourea, peróxido de hidrogeno y ácido sulfúrico respectivamente, con una densidad de pulpa del 20%**

Por otro lado, el uso del impulsor tipo Norstone (Figura 5.3, marcador □), permite la readsorción de los iones plata de forma importante en el intervalo de tiempo entre una y dos horas de lixiviación. No obstante, después de 120 minutos el porcentaje de extracción aumenta alcanzando aproximadamente 70% después de seis horas.

Es posible que debido a que los impulsores como el disco Norstone realizan un corte en la partícula, se liberen fases presentes en la misma permitiendo así una mayor disposición de la plata, mejorando por tanto la recuperación global.

Con el fin de cuantificar la plata en el residuo sólido de cada lixiviación, al finalizar ésta, se filtró, enjuagó y secó al aire el sólido; y posteriormente, se realizó una digestión ácida para disolver completamente el sólido. Los resultados pueden observarse en la Tabla 5.1

Tabla 5. 1 Porcentaje total de plata extraída del mineral para cada uno de los sistemas de agitación empleados en la lixiviación

Método	% Extracción
Tiourea – barra magnética (Ultrasonido)	73.71
Tiourea - Disco Norstone	52.05
Tiourea - Turbina Rushton	24.41
Tiourea - barra magnética	15.78
Cianuro - barra magnética	4.84

Es importante hacer énfasis en los niveles de extracción que se alcanzan al utilizar el disco Norstone al final de la lixiviación, Tabla 5.1, mismos que son comparables con los logrados en el sistema de tiourea que fue perturbado con ondas ultrasónicas.

El efecto que el alto corte tiene sobre la lixiviación de plata a partir del mineral empleado, ya sea mediante la radiación con ondas ultrasónicas o bien mediante el uso de un impulsor como el disco Norstone, permite obtener mejoras

sustanciales en la cantidad de plata extraída, con respecto a lo observado en sistemas tradicionales como el cianuro o alternativos como la tiourea. Esto se puede asociar a que la plata contenida en las diferentes fases del mineral utilizado, es liberada después de cierto tiempo y puede quedarse expuesta más fácilmente como partícula. Con el fin de obtener mayor información sobre el motivo de este efecto, los sólidos remanentes después de cada lixiviación, también fueron observados en un Microscopio Electrónico de Barrido, SUPRA 55 VP, mediante el detector de electrones secundarios.

### 5.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

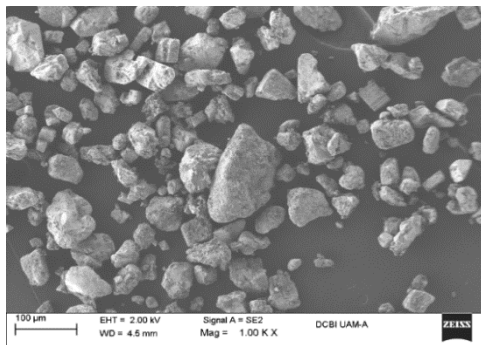
En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la Microscopía Electrónica de Barrido, utilizando el detector de electrones secundarios para obtener la morfología de las partículas.

En la Figura 5.4a se muestra la micrografía del residuo de la lixiviación tiourea - ultrasonido, donde las partículas observadas son en su mayoría homogéneas y bien definidas, de baja porosidad y sin rastros de partículas finas. Esto se debe a que, en la radiación ultrasónica, las partículas de mineral son tratadas a través de ondas en frecuencias específicas y no destruyen el mineral, sino que homogeniza las partículas. De ésta manera, los metales que se encuentran encapsulados en otras fases o asociados, son liberados y expuestos. Particularmente, la plata, presente como sulfuro de plata, al entrar en contacto con el oxidante y el agente complejante, se extrae al seno de la solución.

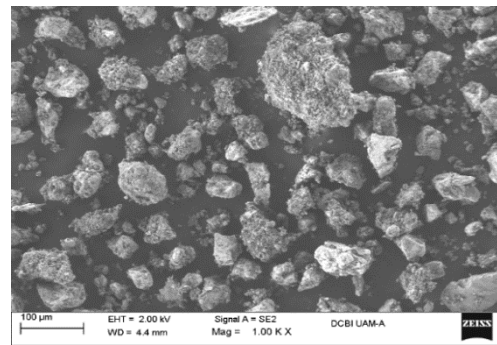
En el caso del residuo de la lixiviación tiourea con el disco Norstone (ver Figura 5.4b), se observan partículas de tamaños distintos, porosas y heterogéneas respecto al brillo entre ellas mismas; en este caso, el material es golpeado por efecto del alto corte que inyecta este tipo de impulsor sobre las partículas. Aun cuando el contacto sólido-mineral es controlado, la interfaz expuesta puede dejar a las partículas porosas y poco definidas, en donde pueden encontrarse las fases de plata que no son liberadas.



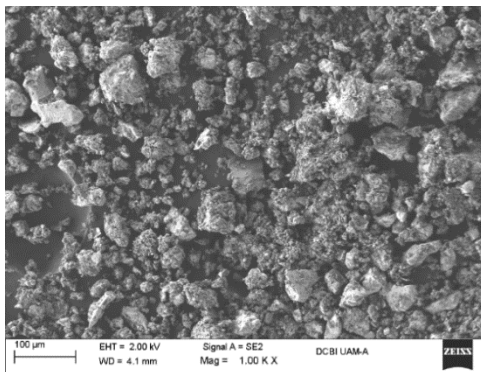
Por otro lado, de acuerdo a lo observado en la Figura 5.4c, las partículas del residuo de la lixiviación tiourea-Rushton, presentan aglomerados y partículas heterogéneas. Este comportamiento es similar a aquél observado por el disco Norstone, debido a que el funcionamiento de ambos impulsores es similar; sin embargo, se observa que cuando se utiliza la turbina Rushton, se tienen aglomerados, que probablemente puedan ser formados durante la lixiviación por la forma del impulsor.



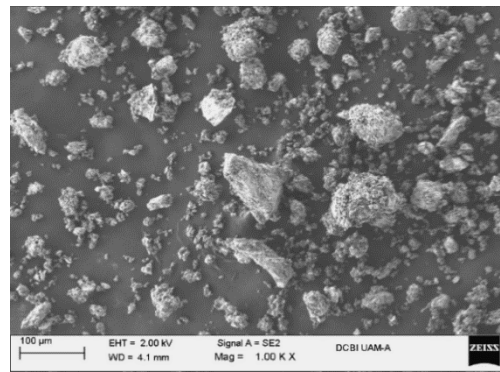
a)



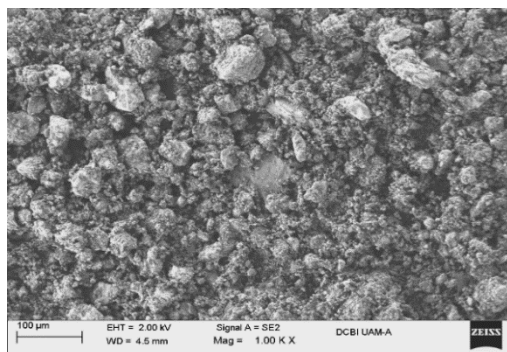
b)



c)



d)



e)

**Figura 5. 4 Micrografías de los residuos obtenidos de las lixivitaciones de 6 horas con diferentes sistemas de agitación, de izquierda a derecha; a) Tiourea-Ultrasonido, b) Tiourea-Disco Norstone, c) Tiourea-Turbina Rushton, d) Tiourea-agitación magnética y e) Proceso de cianuración.**

Cuando la lixiviación del mineral con tiourea se realizó mediante agitación con una barra magnética solamente, Figura 5.4d, el residuo del mineral mostró tamaño de partículas heterogéneo. En este caso, dentro del mismo vaso donde se agitó el mineral, existen puntos muertos que conllevan al incremento de la resistencia por transferencia de masa de la partícula.

El residuo del proceso de cianuración muestra un aglomerado general formado por partículas homogéneas porosas como se observa en la Figura 5.4e. En el sistema de cianuro, se ha informado en la literatura (Luna y Lapidus, 2000) que, durante el proceso, la partícula tiene una porosidad inicial y un tamaño de partícula, que después de la cianuración, ésta disminuye de manera homogénea, lo cual indica un ataque a todo el mineral, no solamente a las fases de plata que se encuentran libres. Por otro lado, la desventaja de la cianuración radica en que el cianuro es una especie química que forma, de manera instantánea, complejos de cobre, hierro, y cinc, que generalmente se encuentran en minerales como el que aquí se utilizó y esto hace que el consumo de cianuro sea mayor y que en las fases de plata refractarias, sea difícil extraer este metal. Finalmente, en el

caso de tiourea en la reacción a nivel micro, ésta es más selectiva para este mineral que el cianuro.

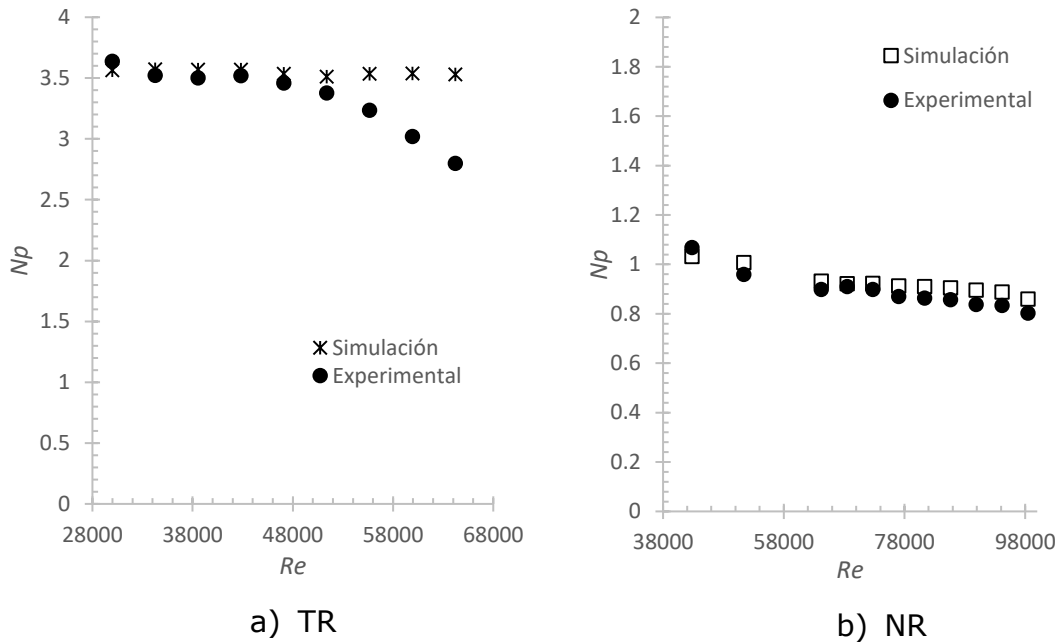
## **5.4 Desempeño hidrodinámico de los impulsores**

En esta sección se compara el desempeño de los dos impulsores estudiados a diferentes velocidades de agitación o a un mismo consumo de potencia (25 W), mediante simulación numérica.

### **5.4.1 Validación de la simulación**

Una técnica que se usa generalmente para la validación de la simulación es la comparación de parámetros hidrodinámicos, tales como el  $N_p$  y  $N_Q$ , contrastándolos con datos obtenidos experimentalmente (Lane, 1997). Para esta investigación los datos experimentales se obtuvieron en un tanque agitado con baffles, usando agua como fluido de proceso.

En la Figura 5.5 se puede observar que los resultados de la simulación y de los datos experimentales son parecidos en ciertos intervalos del número de Reynolds, con un error relativo de hasta 20% para la turbina Rushton y de hasta el 6% para el disco Norstone. Para la turbina Rushton el error comienza a incrementarse a partir de 1200 rpm ( $Re=50,000$ ), debido a que a esta velocidad el impulsor comienza a incorporar una gran cantidad de aire hacia el seno de la solución; lo que disminuye la viscosidad y densidad efectiva del fluido, razón por la cual la potencia experimental presenta diferencias significativas con respecto a la potencia calculada numéricamente. Este fenómeno no se observa para el disco NR, ya que éste induce un menor bombeo y una menor incorporación de aire hacia el sistema.



**Figura 5. 5 Curva de potencia experimental y numérica: a) Turbina Rushton, y b) Disco Norstone**

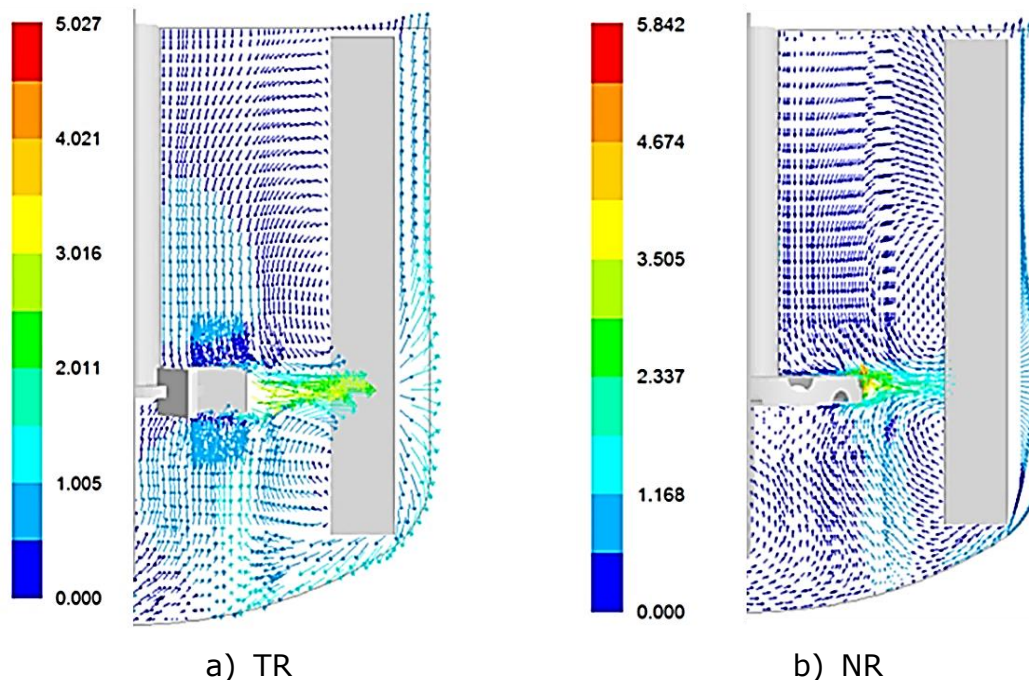
En la Figura 5.5 también puede observarse que valores de  $N_p$  de la TR son mayores que los valores del disco NR, implicando que, si se operara a la misma velocidad de agitación, la turbina consumiría mayor potencia haciendo más elevado el costo de operación del proceso de lixiviación al consumir mayor cantidad de energía. Sin embargo, a una misma potencia inyectada, el disco NR giraría más rápido, lo cual es deseable en procesos limitados por corte como es el caso evaluado en este trabajo para la recuperación de plata, la cual se encuentra dentro de aglomerados de partículas. Por lo tanto, el impulsor que tendría un mejor desempeño para fines de extracción de plata es el disco Norstone, situación que concuerda con los resultados experimentales de recuperación discutidos en la Figura 5.3.

#### 5.4.2 Campos de velocidades

En la Figura 5.6 se presentan los patrones de flujo en términos de los vectores de velocidad a un mismo consumo de potencia (25 watts), dicho valor de

potencia es el mismo que se utilizó en la experimentación con el sistema tiourea-mineral. Los vectores se presentan en un plano vertical evaluado en  $z=0$ . Se observa la existencia de dos lazos de circulación, uno por encima y otro por debajo del impulsor. Además, se observa que en la zona debajo del impulsor existe una mayor intensidad en la circulación del fluido en comparación con la parte que está en la parte superior del mismo. Esto se debe a que el volumen de fluido contenido por debajo del impulsor es menor con respecto al volumen existen en la zona superior del impulsor.

Si se comparan ambos impulsores se puede notar que la circulación producida por la TR es más intensa que la inducida por el disco NR. Por otro lado, se observa que el flujo en el disco Norstone desciende hacia el centro con una velocidad menor. Sin embargo, puede observarse que para ambos impulsores el flujo incide axialmente en sus respectivos puntos extremos, lo cual significa que sobre estos puntos se inducen los valores máximos de gradientes de velocidad.

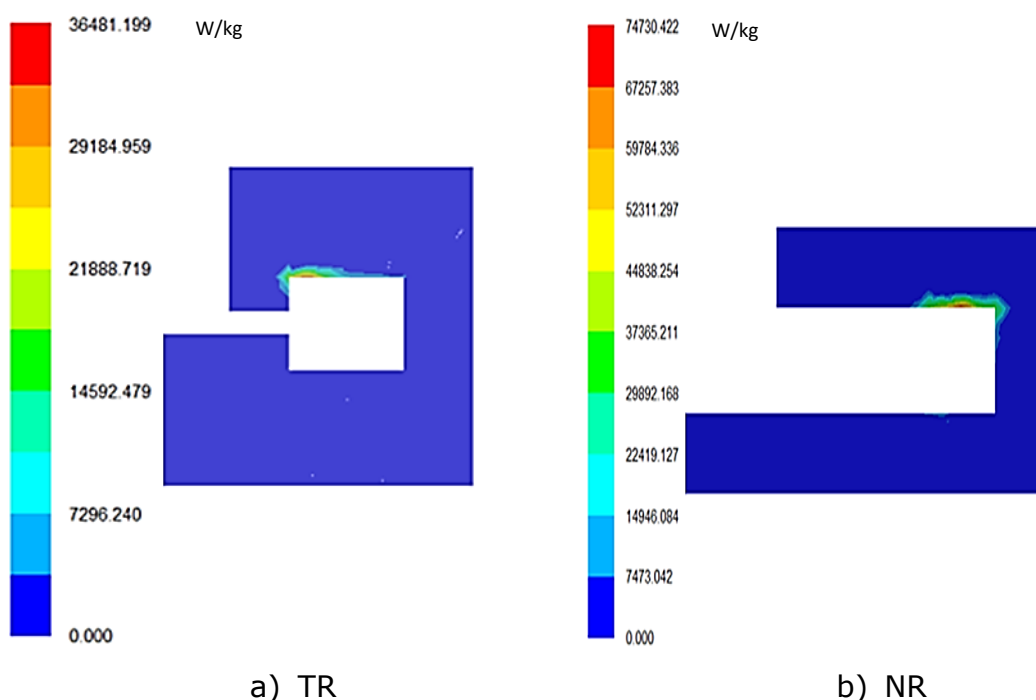


**Figura 5. 6 Campos de velocidad a un mismo consumo de potencia ( $P=25$  W), a) turbina Rushton y b) disco Norstone.**

### 5.4.3 Disipación de energía

Como se mencionó anteriormente, la disipación de la energía es otro parámetro hidrodinámico que influye en la dispersión de los aglomerados de partículas. Con el fin de evaluar el desempeño de los impulsores se obtuvo la tasa de disipación de energía directamente de las simulaciones.

En la Figura 5.7 se observa que los valores máximos de disipación se encuentran en los bordes tanto del disco Norstone como de las cuchillas de la turbina Rushton, resultados que se relacionan con los cambios repentinos de velocidad que se aprecian en el mismo plano de la Figura 5.6, produciendo un gradiente de velocidad de gran magnitud y que son reflejados en valores más altos de la tasa de disipación. Puede observarse también en la Figura 5.7 que, a una misma potencia inyectada de 25 W, los valores máximos de disipación de energía producidos por el disco NR duplican los valores de la TR.



**Figura 5. 7 Contorno de disipación en W/kg a una misma potencia inyectada de 25 W, a) Turbina Rushton y b) Disco Norstone**

Con respecto al comportamiento hidrodinámico de los impulsores estudiados en el sistema mineral, se encontró que, a una misma potencia inyectada (25 W), el impulsor que induce mayores valores de corte (o mayores valores de disipación local turbulenta), mejora significativamente el proceso de lixiviación de plata, lo cual es acorde con la literatura (Baldyga, 2007); (Ramírez-Gómez, 2015). Por lo cual, este parámetro es uno de los factores que afectan la extracción de plata remanente en aglomerados de partículas para el proceso hidrometalúrgico, esto se puede observar tanto en la Figura 5.3 como en la Figura 5.7. Al inyectar mayor corte con el disco NR, los aglomerados de las partículas minerales disminuyen su tamaño, dejando parte del metal de interés (en este caso plata) más expuesto al agente lixivante, y con ello se incrementa la tasa de recuperación de plata.

## Capítulo 6

### Conclusiones

---

En esta investigación se realizó un estudio hidrodinámico del desempeño de dos impulsores; uno de alto corte (disco Norstone) y uno convencional (turbina Rushton), con el fin de mejorar el proceso de extracción de plata contenido en minerales refractarios o de baja ley.

Como parte fundamental de este estudio, se calcularon mediante simulación, los parámetros hidrodinámicos de los dos sistemas de agitación como son número de potencia y tasa promedio de disipación de energía, los cuales mostraron que el disco Norstone permite generar mayor cizallamiento.

Al analizar los resultados de las pruebas de lixiviación a la luz de los cálculos hechos durante la simulación, quedó de manifiesto que la recuperación de metales y en particular de plata se ve favorecida por la inyección de alto corte a la mezcla sólido líquido, por lo que es recomendable utilizar impulsores de alto corte en la lixiviación de minerales.

Los resultados alcanzados en el presente trabajo, pueden contribuir a mejorar el proceso de lixiviación de minerales en general y más aun de los de tipo refractario, con lo que se estaría en posibilidad de abrir todo un campo dentro de la industria minero metalúrgica.



---

## Bibliografía

Alonso-Gómez, A. R., Lapidus, T. G., (2009). Inhibition of lead solubilization during the leaching of gold and silver in ammoniacal thiosulfate (effect of phosphate addition), *Hydrometallurgy*, 99(2009), 89-96

Andrews, D. Raychaudhuri. A. & Frias. C., 2009. Enviromentally sound tecchnologies for recycling secondary lead. *journal Power Sources*, 88(1), 124-129.

Anjum, F., Shahid M. & Akcil, A., 2012. Biohidrometallurgy Techniques of own grade ores: a review on black shale. *Hidrometallurgy*, 117-118(2012), 1-12.

Arrieta, V., 2012. Metodología de optimización numérica multi-objetivo y de simulación numérica de la interacción fluido-estructura del desempeño de un agitador con impulsor PBT variando el ángulo, altura y velocidad de rotación utilizando ANSYS CFX, *Tesis Licenciatura*. Pontifica Universidad Catolica del Perú, Lima, Perú, 25-32.

Baldyga, J., Orciuch, W., Makowski, L. Malaski, M., 2007. *Break up of nano-particle clousters in high.shear devices*. Chemical Engineering and Processing, 46(2007), 851-861.

Buerhend, O. R., 2010. Estudio de velocidades y arrastre de sólidos en empresas de Mezclado de lodidos de perforación. *Tesis de maestría*, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 15-36.

Delgon D. A., Meyer. C. J., 2006. CFD modelling of stirred tanks: numerical considerations. *Minerals Engineering*, 19(2006), 1059-1068.

Hilson, G., Monhemius. A. j., 2005. Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future?. *Journal of Cleaner Production*, 14(2006), 1158-1167.

Hoffmann, E. J., 1992, Recovering precious metals from electronic scarp, *JOM*, 44(7), 43-48.

Jinshan, L. & Miller D. J., 2007. Reaction kinetics of gold dissolution in acid thiourea solution using ferric sulfate as oxidant. *Hydrometallurgy*, 89(2007), 279-288.

Lane, G., Koh. P., 1997. CFD Simulation of Rushton Turbine in a Bafled Tank. *Inter. Conf. CFD on Mineral & Metal Procesing and Power Generation*, 377-386.

Lorezini, G. Conti. A., De Wrachien. D., 2012. *Computational fluid Dynamics (CFD) picture of water droplet evaporation in air*. Irrigaton Drainage Systm Engennering 1:101. doi:10.4172/2168-9768.1000101, 1-12.

Luna, R. M. & Lapidus. G. T., 2000. *Cyanidation kinetics of silver sulfide*. *Hydrometallurgy*, 67(2000), 171-188.

Mc. Cabe, W. L. Smith. C. J. Harriott. P., 2007. *Operaciones Unitarias en Ineniería Química*. 7a ed. México: Mc Graw Hill, 1211.

Murthy, P. D. & P., 1996. *Leaching of gold and silver from Miller Process dross through non-cyanide leachants*. *Hidrometallurgy*, 42(1996), 27-33.

Oldshue, J. Y., 1983. *Fluid Mixing Technology, Chemical Engineering*. 1a ed. New York, N. Y.: McGraw-Hill, 574.

Örgül, S. & Atalay. Ü., 2002. *Reaction Chemistry of gold Leaching in Thiourea Solution for a Turkish gold*. *Hydrometallurgy*, 56(2002), 71-77.

Ramírez-Goméz, R., Martínez, G., Alonso. A. y. Ramírez. J., 2015. *Performance evaluation of two high shear impellers in an unbaffled stirred tank*. *Engineering Technology*, 38(9), 1519-1529.

Ramirez-Gomez, 2015. *Estudio de la hidrdinámica de dos dispersores de alto corte usndo Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)*, Tesis de maestria, UAM-Azcapotzalco, Ciudad de México, 65

Sheng, P. P. & Etsell. T. H., 2007. *Recovery of gold from computer circuit board scarp using aqua regia*. *Waste Management & Research*, 25(4), 380-383.